

ANÁLISIS DEL CONSUMO DE ENERGÍA EN AMBIENTES INTERIORES

Autora: María Teresa Grueiro Domínguez

Tesis Doctoral UDC / Año 2017

Directores: José Antonio Orosa García

José Antonio Pérez Rodríguez

**Programa Interuniversitario de Doctorado en
Ingeniería Marítima**



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

Agradecimientos

Mis agradecimientos a mis directores de tesis, sin su ayuda no hubiera sido posible desarrollar esta tesis. En especial al profesor José Antonio Orosa por su gran paciencia, ayuda y ánimo que me ha proporcionado en todo momento durante todos estos años. A mis padres por su apoyo.

Gracias a todos.

Va por ti:

Jesús V. Grueiro Pico.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL

PARTE I: PLANTEAMIENTO Y RESUMEN DE LA TESIS	5
CAPÍTULO 1: RESUMEN DE LA TESIS	7
1.1. Objeto de la Tesis. Antecedentes	9
1.2. Principales Aportaciones a la Discusión	10
1.3. Estructura de la Presente Memoria de Tesis Doctoral.....	11
CAPÍTULO 2: PROBLEMÁTICA DE LA SALA DE MÁQUINAS.....	13
2.1. Introducción a la Problemática de la Sala de Máquinas	15
2.2. Confort y Estrés Térmico. Prevención de Riesgos Laborales.....	17
2.3. Ahorro Energético. Normativa y Disposiciones SEEMP	20
2.4. Sistema de Ventilación en Buques	24
2.5. Referencias.....	26
PARTE II: MATERIALES Y MÉTODOS	29
CAPÍTULO 3: RECURSOS MATERIALES Y EQUIPOS	31
3.1. Breve Descripción del Buque Teneo	33
3.2. Medida de las Condiciones Ambientales Interiores	38
3.3. Herramientas de Modelado 3D	43
3.4. Herramientas de Simulación y Análisis.....	45
3.5. Referencias.....	49
CAPÍTULO 4: ESTRÉS TÉRMICO Y FATIGA. NORMATIVA.....	51
4.1. Estrés Térmico y Fatiga. Consecuencias sobre el Organismo	53
4.2. Normativa de Interés.....	57
4.3. Tiempos de Exposición Admisibles. NTP 350	60
4.4. Tiempos de Recuperación y Descanso. NTP 18	68
4.5. Otras Normas de Interés.....	72
4.6. Referencias.....	76
PARTE III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	79
CAPÍTULO 5: SIMULACIÓN Y ANÁLISIS CFD DE LA SALA DE MÁQUINAS	81
5.1. Caracterización de la Sala de Máquinas. Modelo Tridimensional.....	83
5.2. Simulación CFD. Validación Experimental.....	86
5.3. Análisis de las Condiciones Ambientales. Puntos Críticos	88
5.4. Principales Parámetros. Variación con el Régimen de Ventilación.....	93
5.5. Referencias.....	96

CAPÍTULO 6: ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DE TAREAS Y TIEMPOS...	97
6.1. Condiciones de Trabajo en la Sala de Máquinas.....	99
6.2. Máximo Tiempo de Trabajo Admisible.....	99
6.3. Tiempos de Descanso y Recuperación	100
6.4. Distribución Diaria de Tareas. Análisis y Optimización.....	101
6.5. Otras Tareas de Interés.....	105
6.6. Referencias	109
CAPÍTULO 7: OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN.....	111
7.1. Criterios de Diseño y Optimización.....	113
7.2. Ahorro Energético.....	114
7.3. Condiciones Ambientales en la Sala de Máquinas.....	116
7.4. Referencias	125
PARTE IV: CONCLUSIONES.....	127
CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES	129
8.1. Conclusiones	131
8.2. Principales Contribuciones a la Discusión	132
8.3. Líneas de Futuro Desarrollo	133
PARTE V: REFERENCIAS	135
ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS.....	145
NOMENCLATURA.....	151
PUBLICACIONES DERIVADAS DE LA TESIS	159
BREVE RESUMEN EN OTROS IDIOMAS.....	169
BREVE RESUMEN EN GALEGO.....	171
9.1. Obxecto da Tese. Antecedentes.....	173
9.2. Principais Aportacións á Discusión.....	174
9.3. Estrutura da Memoria de Tese Doutoral.....	175
SHORT SUMMARY	177
10.1. Aim of the Thesis. Motivations.....	179
10.2. Main Contributions to Discussion.....	180
10.3. Organization of the Present PhD. Thesis Dissertation.....	180

PARTE I

PLANTEAMIENTO Y RESUMEN DE LA TESIS

CAPÍTULO 1: RESUMEN DE LA TESIS

1.1. Objeto de la Tesis. Antecedentes

En el entorno socioeconómico actual, altamente competitivo y con costes energéticos crecientes, resulta esencial la adopción de nuevas estrategias de optimización y ahorro energético orientadas a un uso eficaz de los recursos disponibles, sobre todo en el caso de equipos y sistemas móviles, por cuanto el combustible debe ser transportado por el propio elemento, reduciendo tanto el espacio libre disponible, como la carga útil transportable.

Este aspecto adquiere especial relevancia en el caso de buques y artefactos marinos, teniendo en cuenta que no existe una red de estaciones de servicio suficientemente amplia en las que se pueda repostar fácilmente y cualquier intento de repostaje en alta mar resulta altamente complejo y costoso, requiriendo no solo buques especiales de avituallamiento, sino también un adecuado estado de la mar.

Como consecuencia, en la actualidad el transporte marítimo representa uno de los objetivos clave en las políticas de ahorro energético a nivel mundial, de tal modo que en el año 2009 el Comité de Protección del Medio Marino (MEPC) de la Organización Marítima Internacional (IMO), tomando conciencia del problema, promueve el desarrollo de una completa estrategia para la mejora del desempeño energético en buques.

En base a los trabajos del comité, en 2011 el IMO aprueba el Plan de Eficiencia Energética en Buques (SEEMP), marco regulatorio obligatorio bajo el que se engloba un amplio conjunto de medidas técnicas y operacionales en materia de eficiencia energética en buques, el cual ha entrado en vigor en enero de 2013.

Los estudios efectuados en el marco SEEMP permiten establecer que entre los principales puntos de consumo de energía en un buque convencional, además del sistema de propulsión, cabe destacar el sistema de ventilación y renovación de aire de la sala de máquinas, el cual representa aproximadamente entre el 3,5% y el 5,5% de la potencia nominal instalada.

Como resultado, la sala de máquinas constituye actualmente uno de los puntos clave en donde sería de gran interés aplicar una estrategia completa de mejora de la eficiencia energética en un buque.

Sin embargo, al igual que ocurre en cualquier otra instalación compleja, para garantizar un correcto desempeño de la misma, no basta simplemente con instalar nuevos sistemas y equipos, con sus correspondientes algoritmos de control, sino que es necesario realizar un profundo estudio previo de las necesidades reales del sistema.

En base a todas estas consideraciones, la presente tesis doctoral se centra en el estudio de la sala de máquinas de buques modernos, un excelente ejemplo de ambiente interior industrial extremo, en el que frecuentemente las condiciones de servicio de los equipos y personas que trabajan en dicha instalación superan ampliamente los límites admisibles.

Sin embargo, a pesar de su importancia, hasta la actualidad dicha problemática no ha sido tratada con el rigor y profundidad requeridos, ni por parte de las normativas y recomendaciones oficiales, ni por parte de los propios diseñadores y usuarios, aun cuando los efectos de la exposición del cuerpo humano a altas temperaturas son relativamente conocidos.

Cabe destacar en este sentido, que todavía hoy existe un elevado desconocimiento acerca de las condiciones reales de trabajo en la sala de máquinas y su consecuente influencia tanto en el desempeño y eficacia de las tareas ejecutadas, como fundamentalmente en la seguridad y salud del personal que allí trabaja.

Como consecuencia, el desarrollo de una nueva metodología eficaz para la optimización de ambientes interiores en buques, requiere un exhaustivo análisis previo de las condiciones reales de servicio, que permita establecer las condiciones óptimas para que el personal de abordó pueda desempeñar sus tareas de forma eficaz y segura, minimizando al mismo tiempo el consumo de energía en los equipos e instalaciones.

1.2. Principales Aportaciones a la Discusión

La presente tesis doctoral analiza en profundidad todos los aspectos relacionados con el funcionamiento del sistema de ventilación y el consumo de energía en ambientes interiores industriales extremos, tomando como referencia la sala de máquinas de un buque cablero de última generación.

Teniendo en cuenta la complejidad del tema, además de aspectos puramente energéticos, es necesario tener en cuenta las disposiciones vigentes en materia de seguridad e higiene en el trabajo, de tal modo que el presente análisis se centra en tres aspectos clave:

- Análisis y caracterización de las condiciones térmicas de la sala de máquinas en base a un modelo CFD tridimensional validado experimentalmente con datos reales de navegación.
- Análisis de las tareas a efectuar por el personal y mejora de las condiciones de trabajo del mismo.
- Optimización energética del sistema.

Entre las principales aportaciones originales a la discusión cabe destacar el establecimiento de una novedosa metodología para el análisis y optimización energética de entornos extremos directamente aplicable a toda clase de instalaciones industriales complejas.

La metodología propuesta combina eficazmente los criterios de eficiencia energética con el cumplimiento de los requisitos y disposiciones vigentes en materia de seguridad y salud en el trabajo, siendo fácilmente aplicable tanto durante el diseño de nuevas instalaciones, como también para la optimización y mejora de instalaciones ya en servicio.

Además, de un modo complementario, la metodología desarrollada permite detectar de un modo eficaz disfunciones en la organización y planificación de tareas del personal de la sala de máquinas y adoptar las medidas correctivas pertinentes.

1.3. Estructura de la Presente Memoria de Tesis Doctoral

El presente documento, siguiendo la estructura clásica de una memoria de tesis doctoral, presenta de un modo riguroso un análisis exhaustivo sobre el funcionamiento del sistema de ventilación de la sala de máquinas de un buque cablero de última generación, analizando en detalle la problemática asociada y los principales resultados y avances obtenidos.

La presente memoria se ha estructurado en cinco partes claramente diferenciadas, cuyos contenidos se describen brevemente a continuación:

- En la primera parte titulada Planteamiento y Resumen de la Tesis, compuesta por los dos primeros capítulos, se realiza una breve introducción a la presente tesis doctoral, centrada en las motivaciones y antecedentes de la misma, así como en los principales objetivos y resultados alcanzados. De un modo complementario, se analiza la estructura y contenidos de la presente memoria de tesis.
- La segunda parte, titulada Materiales y Métodos, comprende los capítulos tres y cuatro y en ella se analiza el contexto en el que se ha desarrollado la presente tesis doctoral, revisando los equipos y recursos materiales empleados, así como las metodologías de trabajo y los condicionantes aplicables.
- En la tercera parte, titulada Resultados y Discusión, compuesta por los capítulos cinco, seis y siete, se analiza en detalle la metodología propuesta, tanto en lo que respecta a su fundamentación teórica y validación experimental, así como a los principales resultados y avances obtenidos.

- En la cuarta parte, titulada Conclusiones, se realiza una valoración final del trabajo efectuado, presentando las principales conclusiones alcanzadas y estableciendo algunas propuestas interesantes para futuros desarrollos en base a la experiencia adquirida durante el presente estudio.
- Finalmente, en la quinta parte, titulada Referencias, se presenta una relación no exhaustiva de la bibliografía de referencia manejada durante la realización de la presente tesis doctoral.

De un modo complementario, se incluye como anexo un artículo derivado directamente de la presente tesis doctoral, publicado recientemente en la revista *Applied Thermal Engineering*, revista de máxima relevancia en la materia, la cual de acuerdo con la última edición del ISI JCR ocupa la 6ª posición a nivel mundial en el ámbito de la Termodinámica y la Ingeniería Térmica.

Además, con el objeto de facilitar su difusión científica, se incluye como referencia un breve resumen de la tesis en otros idiomas relevantes, tales como el inglés y el gallego.

CAPÍTULO 2: PROBLEMÁTICA DE LA SALA DE MÁQUINAS

2.1. Introducción a la Problemática de la Sala de Máquinas

La sala de máquinas de un buque moderno es un entorno altamente complejo, con un gran número de instalaciones y equipos, en el cual además se genera una gran cantidad de calor que debe ser evacuado al exterior con objeto de mantener unas condiciones de trabajo mínimamente aceptables [2.18].

Por otra parte, es necesario tener en cuenta que la tripulación que trabaja en la sala de máquinas debe realizar frecuentemente diversas tareas de mantenimiento e inspección y control, tales como la toma de muestras y revisión de niveles, la revisión de los distintos elementos térmicos y el muestreo de la flexión del eje del motor principal durante la navegación, entre otras [2.17, 2.18].

En muchas de estas actividades se estima una tasa metabólica alta e incluso muy alta, aspecto que unido al ambiente extremo existente en la sala de máquinas de un buque supone un serio riesgo para la salud del personal, tal y como establece en diversos informes la Organización Internacional del Trabajo (OIT) y la Organización Marítima Internacional (IMO) [2.7, 2.8, 2.10].

Diversos estudios científicos, permiten establecer una correlación directa entre las condiciones de trabajo extremas existentes y el gran número de accidentes laborales que tienen lugar en la sala de máquinas de un buque [2.3, 2.6, 2.11, 2.19].

Concretamente, se estima que actualmente más del 35% de los accidentes en un buque se producen en la sala de máquinas, de acuerdo con un amplio estudio publicado en base a datos de accidentes procedentes de más de 6000 buques de los 11 países del mundo con las flotas más importantes [2.11].

Todas estas consideraciones ratifican un completo estudio publicado por la British Royal Navy en el año 1948, en el cual se estima que aproximadamente el 1% de todas las bajas que se produjeron en la Royal Navy durante la II Guerra Mundial se debía a problemas relacionados con lo que simplemente denominaban 'heat exhaustion', una forma arcaica de designar lo que actualmente se conoce como estrés térmico, proponiendo una serie de recomendaciones muy interesantes al respecto [2.3].

Entre otros aspectos a destacar, el estrés térmico puede dar lugar a múltiples problemas, desde leves molestias y cambios fisiológicos, tales como sensación de malestar, irritabilidad, disminución de la efectividad y pérdida de agua y sales minerales, hasta otras alteraciones más serias, tales como agotamiento, golpes de calor, desorientación, inconsciencia y otros problemas graves para la salud [2.15, 2.17, 2.18].

Para prevenir tales consecuencias, diversos organismos internacionales coordinados por la Organización Internacional del trabajo (OIT), han establecido la necesidad de limitar el tiempo de exposición a tales condiciones, sobre todo si se desarrollan en el lugar de trabajo [2.7, 2.8, 2.9, 2.10].

Sin embargo, a pesar de todo, a día de hoy sigue sin existir un procedimiento normalizado claro y eficaz para el diseño de la cámara de máquinas teniendo en cuenta tanto las distintas actividades a realizar, así como los riesgos derivados de la fatiga y el ambiente térmico extremo [2.13, 2.18].

En este sentido, cabe señalar como principal limitación práctica para el desarrollo de nuevos procedimientos, el gran vacío de información acerca de las condiciones reales de trabajo en la sala de máquinas y las escasas referencias acerca de los tiempos máximos de trabajo y los respectivos tiempos de descanso necesarios para los miembros de la tripulación sometidos a dichas condiciones extremas [2.17, 2.18].

Como consecuencia, se puede concluir que la sala de máquinas de un buque moderno constituye actualmente un ambiente prácticamente desconocido desde el punto de vista de la Ingeniería Térmica y la investigación en ambientes interiores [2.12, 2.16, 2.17, 2.18].

Por otra parte, además de los aspectos de seguridad e higiene, todo análisis en profundidad del ambiente interior extremo de la sala de máquinas debe tener en consideración el alto consumo de energía del sistema de ventilación [2.17, 2.18].

En esta línea, como parte de su compromiso medioambiental, en los últimos años la Organización Marítima Internacional ha aprobado diversas medidas orientadas a la mejora de la eficiencia y el ahorro energético en buques y la reducción de las emisiones a la atmósfera de gases de efecto invernadero derivados del transporte marítimo [2.1].

Como primera medida relevante, cabe destacar el Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques (MARPOL), adoptado en 1973 y constituido actualmente por seis anexos [2.1, 2.2].

Concretamente, el último de dichos anexos, adoptado en 2005 y revisado en 2011, establece una serie de medidas y reglas para prevenir la contaminación atmosférica ocasionada por los buques [2.2].

Dentro de esta misma línea, en el año 2009 el Comité de Protección del Medio Marino (MEPC) de la Organización Marítima Internacional promueve el desarrollo de una completa estrategia para la mejora del desempeño energético en buques, conocida como Plan de Eficiencia Energética en Buques (SEEMP), iniciativa que finalmente ha entrado en vigor en enero de 2013 [2.1].

En una primera aproximación, las medidas de ahorro energético propuestas por el SEEMP se centran en dos aspectos clave, la mejora del diseño del casco del buque y la optimización del sistema de propulsión [2.1].

De todos modos, a pesar de los esfuerzos, hoy en día la optimización y el ahorro energético abordado de buques mercantes es todavía una tarea pendiente de gran interés en cuanto a sus efectos no solo en términos económicos, sino también en términos de reducción de las emisiones de gases contaminantes.

En definitiva, como conclusión, tras un análisis exhaustivo de las normativas nacionales e internacionales y los trabajos de investigación más relevantes en la materia, se puede establecer que la sala de máquinas constituye uno de los puntos clave en donde sería de gran interés y utilidad aplicar una estrategia completa de mejora de la eficiencia energética en un buque.

2.2. Confort y Estrés Térmico. Prevención de Riesgos Laborales

Formalmente, el confort térmico expresa el grado de satisfacción de los individuos en un ambiente térmico concreto, de tal modo que se puede decir que un individuo se encuentra en una situación de confort térmico cuando, para una actividad normal y una indumentaria típica, experimenta una sensación neutra, no sintiendo ni frío ni calor [2.4].

Como consecuencia, el confort térmico es un concepto subjetivo y relativamente ambiguo, derivado en gran medida de la capacidad del propio individuo para mantener el equilibrio homeostático independientemente de las condiciones del entorno.

Por contraposición, cuando no hay confort térmico y existe un grado de insatisfacción térmica elevado por parte de los individuos, sea por frío o calor, aparece el estrés térmico [2.4].

Se puede definir el estrés térmico como la sensación de malestar que experimenta una persona cuando su permanencia en un ambiente determinado exige esfuerzos desmesurados a los distintos mecanismos que posee el organismo para mantener la temperatura interna, como consecuencia de una exposición a condiciones extremas [2.4, 2.14, 2.15].

En una primera aproximación, para alcanzar un cierto nivel de confort y evitar molestias y desórdenes en el organismo, esencialmente han de satisfacerse dos condiciones básicas:

- En primer lugar, tanto la temperatura superficial de la piel, como la temperatura del propio organismo deben conducir a una sensación neutra de confort.

- En segundo lugar, dicha sensación ha de mantenerse en el tiempo, para lo cual es necesario que el organismo alcance el equilibrio térmico con el entorno.

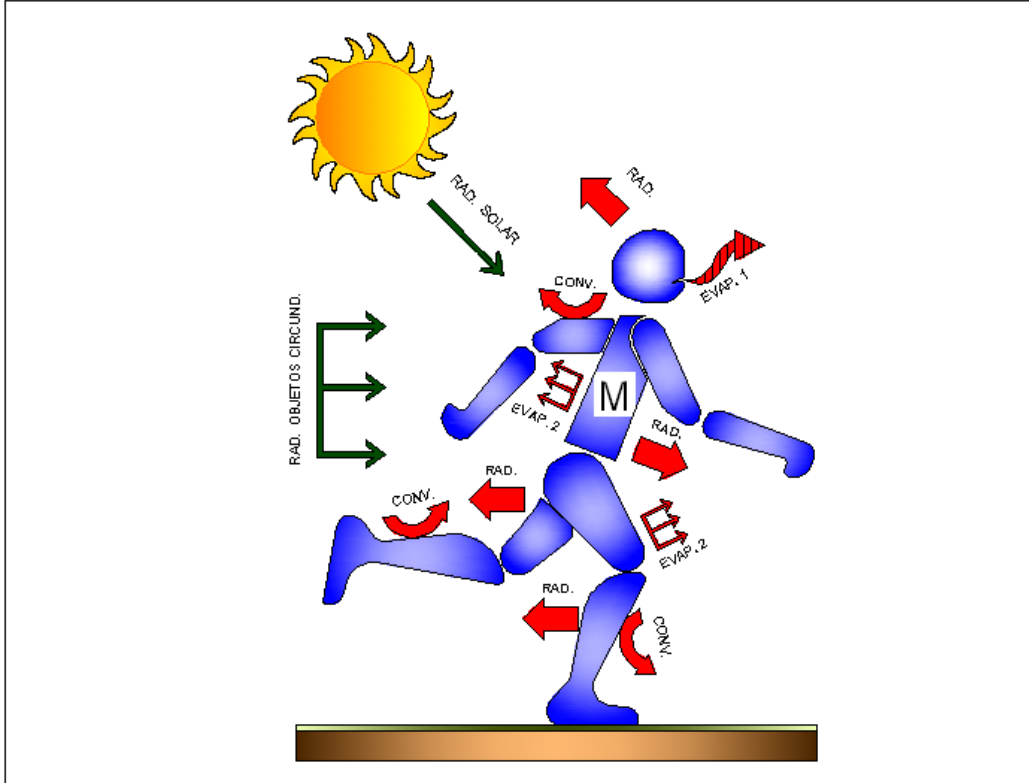


Fig. 2.1. Balance Térmico del Cuerpo Humano.

Alcanzar el equilibrio térmico con el entorno requiere que el calor generado por el organismo a través del metabolismo, más el calor absorbido del entorno, sea igual a la suma de la energía consumida en forma de trabajo mecánico y el calor disipado al medio, tanto directamente por conducción, convección y radiación, como indirectamente mediante la sudoración, de modo que el calor total acumulado S , definido según la ecuación 2.1, sea nulo [2.15].

$$S = (M - W) - (K + C + R) - (C_{resp} + E_{resp}) - E_{sud} \quad (2.1)$$

Ecuación en la que todos los términos se expresan por unidad de superficie y tiempo, es decir en $\frac{W}{m^2}$:

S - Calor total acumulado por el organismo.

E_{sud} - Energía disipada por sudoración.

M - Producción de energía metabólica (Metabolic rate), la cual representa la energía requerida por el organismo para realizar las tareas consideradas. Típicamente se expresa en Met, el cual equivale a una generación de calor de 58 W por m² de superficie del cuerpo.

W - Trabajo útil.

K - Calor intercambiado por conducción.

C - Calor intercambiado por convección.

R - Calor intercambiado por radiación.

C_{resp} - Calor intercambiado por convección respiratoria.

E_{resp} - Calor latente intercambiado por la respiración.

Cabe señalar que, entre otros factores, estos valores están influidos por el vestuario, por cuanto la ropa actúa a modo de aislamiento, reduciendo las pérdidas de calor al entorno.

Generalmente, para cuantificar el grado de aislamiento de una determinada prenda, se emplea una unidad denominada Clo, la cual en términos de resistencia térmica es equivalente a $0,155 \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$.

Teniendo en cuenta que para mantener el equilibrio del organismo, el calor acumulado S debe ser nulo y que en condiciones normales se puede despreciar tanto el trabajo útil W , como el calor intercambiado por conducción K , la sudoración requerida, E_{req} , se calcula directamente como [2.15]:

$$E_{req} = M - (C + R) - (C_{resp} + E_{resp}) \quad (2.2)$$

En base a la sudoración requerida y la máxima sudoración admisible, las distintas normas permiten calcular el máximo tiempo permitido en un cierto entorno y el mínimo tiempo de recuperación en un entorno controlado para que el individuo no corra ningún riesgo [2.14, 2.15, 2.21].

De todos modos, a pesar de que los efectos de la exposición del cuerpo humano a altas temperaturas son relativamente conocidos, todavía hoy existe un elevado desconocimiento acerca de las condiciones reales de trabajo en la sala de máquinas y su consecuente influencia tanto en el desempeño y eficacia de las tareas ejecutadas, como fundamentalmente en la seguridad y salud del personal que allí trabaja [2.17, 2.18].

Como consecuencia, la mayoría de normativa de prevención de riesgos laborales referente a estrés térmico en la cámara de máquinas, inclusive la de la propia Organización Internacional del Trabajo (OIT), se limita a meras recomendaciones genéricas de aplicación bastante limitada a nivel práctico [2.17, 2.18].

2.3. Ahorro Energético. Normativa y Disposiciones SEEMP

En la actualidad el transporte marítimo representa uno de los objetivos clave en las políticas de ahorro energético a nivel mundial, por cuanto se estima que supone a día de hoy más del 2,5% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero [2.1].

Si bien el transporte marítimo es uno de los medios de transporte masivos más eficientes en términos energéticos y sólo contribuye de forma modesta a las emisiones totales de CO₂, es necesario adoptar una estrategia global que permita continuar mejorando su eficiencia energética y el control real de las emisiones, por cuanto el crecimiento del transporte marítimo es imparable, a la par que el comercio mundial [2.1].

Por su naturaleza global, las emisiones de CO₂ procedentes del transporte marítimo internacional no pueden ser atribuidas a ninguna economía nacional en particular, de acuerdo con el Protocolo de Kyoto, siendo la Organización Marítima Internacional el organismo responsable de limitar y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes del transporte marítimo internacional [2.1, 2.2].

Entre las principales medidas adoptadas cabe destacar la aprobación en 2005 del anexo VI del Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques (MARPOL), anexo revisado en 2008, el cual establece las reglas para prevenir la contaminación atmosférica ocasionada por los buques [2.1, 2.2].

Dentro de esta misma línea, en el año 2011 el Comité de Protección del Medio Marino (MEPC) de la Organización Marítima Internacional adoptó una serie de medidas técnicas y operacionales obligatorias en materia de eficiencia energética con el objeto de reducir las emisiones de CO₂ procedentes del transporte marítimo, el Plan de Eficiencia Energética en Buques (SEEMP), iniciativa que ha entrado en vigor en enero de 2013 [2.1].

Entre las medidas propuestas, cabe señalar el establecimiento del Índice de eficiencia energética de proyecto (EEDI) para buques nuevos, el cual tiene como finalidad promover el uso de equipos y maquinaria de mayor eficiencia energética [2.1].

El EEDI establece unos niveles mínimos de eficiencia energética para cada tipo y segmento de buques, los cuales son obligatorios para los buques de nueva construcción a partir de enero de 2013, niveles que serán revisados periódicamente (en principio cada cinco años) con el objeto de fomentar la innovación y acompañar los avances tecnológicos [2.1].

Sin embargo, a pesar de las medidas adoptadas, el crecimiento previsto para el comercio mundial representa un serio desafío en cuanto al cumplimiento de los objetivos de reducción de las emisiones, de tal modo que la Organización Marítima Internacional continúa trabajando activamente en nuevas medidas destinadas a mejorar la eficiencia energética de los buques [2.1].

A modo de resumen, entre los aspectos considerados por el SEEMP, cabe destacar los siguientes:

- Análisis de la eficiencia energética operacional en buques en navegación marítima y fluvial.
- Estudio para el fomento de la navegación a vela y la propulsión eólica en el transporte marítimo internacional.
- Análisis de la eficiencia ambiental de las ciudades portuarias.
- Análisis de la eficiencia energética en el transporte marítimo de corta distancia.
- Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en los nuevos buques.
- Optimización del uso de la energía en la flota pesquera.
- Análisis de la importancia de las características y dimensiones del buque en las emisiones de efecto invernadero a la atmósfera.
- Evaluación ambiental de nuevos combustibles: gas natural licuado, biogás licuado, metanol y bio-metanol.
- Mejora de la eficiencia energética en los viajes, utilizando el índice EEOI.

Esencialmente, en una primera aproximación, las medidas de ahorro energético propuestas por el SEEMP se centran en dos aspectos clave: la mejora del diseño del casco del buque y la optimización del sistema de propulsión [2.1].

A modo de referencia, en lo relativo a la importancia de la mejora del diseño, la Organización Marítima Internacional estima que aproximadamente el 55% del consumo de energía en el sistema de propulsión se debe a la fricción del casco y el 17% a la generación de ondas, valores que se pueden ver

incrementados por el oleaje, el viento y la rugosidad debida al ensuciamiento del casco, entre otros factores [2.5].

En lo referente al sistema de propulsión, una de las propuestas estrella del SEEMP es la sustitución del motor principal por diversos motores más pequeños con una potencia total equivalente, con el objeto de que los motores trabajen la mayor parte del tiempo en su régimen nominal, incrementando considerablemente su eficiencia [2.17].

De un modo complementario, otra propuesta a destacar es la conveniencia de reducir la velocidad de navegación, con el objeto de reducir las pérdidas por fricción, medida que evidentemente incrementaría los tiempos de travesía, por lo que se complementa con una serie de recomendaciones para incrementar las dimensiones y la carga útil de los buques, así como medidas para la optimización de las rutas de navegación marítima [2.1].

Además de las medidas anteriores, otras medidas de interés son la mejora de la calidad de los combustibles y la reducción de contaminantes como azufre, nitrógeno, etc., así como la introducción de sistemas de control electrónico en los equipos y sistemas auxiliares del buque, con el objeto de adaptar el consumo a las necesidades reales en cada instante [2.2].

De todos modos, si bien tal y como se ha destacado anteriormente el trabajo realizado en la materia en los últimos años ha sido intenso y el conjunto de medidas propuestas es muy amplio, abarcando casi todos los ámbitos relevantes, a nivel práctico todavía existe ciertas reticencias para su desarrollo e implantación.

En este sentido, muchos armadores no consideran prioritaria la mitigación del cambio climático, centrandó su interés en gran medida en desarrollar barcos con gran capacidad de carga y que naveguen a la máxima velocidad posible, con el objeto de minimizar los tiempos de transporte y lograr así el mayor número de fletes.

Sin embargo, cabe señalar que actualmente se observa un cierto cambio de tendencia, con un creciente interés en el ahorro energético, derivado de la constatación por parte de muchos armadores de que un menor consumo de combustible supone un incremento de la capacidad de carga útil, aspecto favorecido por el importante incremento del precio de los combustibles en los últimos años.

Para supervisar el grado de cumplimiento de las indicaciones del SEEMP y estimar la mejora real de las emisiones del transporte marítimo, actualmente se contabilizan los datos relativos al consumo real de combustible, comparándolos con los datos relativos a la navegación de los buques y las características de los mismos.

A menudo se observan discrepancias significativas entre los datos de ventas de combustible y el consumo indicado en las notas de entrega, de tal modo que podría ser de gran interés promover nuevos sistemas más eficaces de recogida de datos basados en el Indicador Operacional de Eficiencia Energética, EEOI, propuesto en el SEEMP [2.1, 2.5]:

$$EEOI = \frac{\text{Combustible consumido} \cdot \text{Contenido carbono}}{\text{Distancia navegada} \cdot \text{Carga transportada}} \quad (2.3)$$

Aun cuando la mayoría de las medidas del SEEMP se centran en la navegación marítima, de un modo complementario, también se han publicado estudios específicos sobre la eficiencia energética operacional en barcos fluviales, comparando su consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero con el de los buques de navegación marítima [2.22].

A grandes rasgos, como primera conclusión, la navegación fluvial interior implica mayores consumos, aun cuando las velocidades son menores, por cuanto requiere una mayor capacidad de maniobra, así como una mayor potencia para salvar los obstáculos [2.22].

Asimismo, la existencia de la corriente en las navegaciones fluviales reduce considerablemente la eficiencia energética, en comparación con el transporte en navegación marítima [2.22].

Otra línea interesante de actuación dentro de las propuestas del SEEMP es el fomento de la propulsión eólica, tanto mediante la navegación clásica a vela, como a través de nuevas formas de propulsión tales como los cometas de remolque, los rotores verticales Flettner y las velas giratorias tipo dynarigs entre otros [2.20].

En este sentido, las nuevas herramientas de optimización climática de rutas, en combinación con modernos sistemas de automatización de las velas, son clave para establecer a priori las rutas óptimas e incluso corregir su trazado en tiempo real en base a las condiciones climáticas [2.20].

La combinación eficiente de dichos sistemas con equipos complementarios de propulsión mecánica, cuando la energía eólica no es suficiente, permitiría optimizar los tiempos de travesía, asegurando la competitividad de los buques y reduciendo al mismo tiempo de forma importante el consumo de combustible y consecuentemente las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes del transporte marítimo [2.20].

Sin embargo, en contraste con lo que ocurre en tierra, en donde se realizan grandes inversiones en el fomento y desarrollo de energías renovables, no ocurre así en el caso de la propulsión eólica en el transporte marítimo, en

gran medida como consecuencia de la falta de convicción en que ésta realmente pueda competir con las tecnologías ya establecidas, constituyendo actualmente un serio obstáculo para su desarrollo a gran escala.

2.4. Sistema de Ventilación en Buques

En un buque moderno, la sala de máquinas constituye un entorno extremadamente complejo, con un gran número de instalaciones y equipos, en el cual además se genera una gran cantidad de calor que debe ser evacuado al exterior, de tal modo que los equipos y personas que trabajan en dicha instalación están sometidas a condiciones de trabajo extremas, superándose frecuentemente los límites admisibles [2.18].

Como consecuencia, desde los inicios de la propulsión mecánica en buques, se estableció la necesidad de introducir un caudal mínimo de renovación del aire de la sala de máquinas, si bien los criterios y necesidades establecidas para su dimensionamiento han cambiado radicalmente con el paso del tiempo.

En un principio se consideraba que la renovación de aire simplemente debía garantizar que no se superase un determinado nivel de concentración de CO₂, criterio similar al que se empleaba en las antiguas minas de carbón [2.3].

Sin embargo, ya durante la II Guerra Mundial se puso de manifiesto la necesidad de tener en cuenta las condiciones de trabajo del personal embarcado, sobre todo en buques que servían en zonas tropicales [2.3].

Esencialmente, la ventilación introduce aire fresco, de tal modo que constituye el principal y más eficaz medio de control tanto de la temperatura como de la concentración de contaminantes que pueda existir en la atmósfera de la sala de máquinas.

En este sentido, es necesario tener en cuenta que la dimensión del sistema de ventilación, medida en términos del número de renovaciones de aire por hora, determina en gran medida las condiciones térmicas en el interior de la sala de máquinas y por tanto el tiempo máximo admisible de permanencia por parte del personal.

Además, la ventilación también está directamente relacionada con el confort térmico, por lo que nunca debería crear movimientos de corriente molestos para la tripulación que trabaja en dicho espacio.

De un modo complementario, como consecuencia de la modernización de las instalaciones y la introducción de nuevos equipos electrónicos, es necesario al mismo tiempo garantizar el control de la temperatura ambiente con el objeto

de garantizar el correcto funcionamiento de los equipos y evitar averías innecesarias.

Por otra parte, cabe recordar que el sistema de ventilación y renovación de aire de la sala de máquinas constituye uno de los principales puntos de consumo de energía en un buque convencional, representando aproximadamente entre el 3,5% y el 5,5% de la potencia nominal instalada [2.18].

En consecuencia, en base a las consideraciones anteriores, la sala de máquinas constituye uno de los puntos clave en donde resulta de gran interés aplicar una estrategia completa de mejora de la eficiencia energética en un buque, tal como la desarrollada en la presente tesis doctoral.

2.5. Referencias

- [2.1] Contaminación atmosférica, eficiencia energética y emisiones de gases de efecto invernadero: <http://www.imo.org/es/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Paginas/Default.aspx> (Acceso septiembre 2016).
- [2.2] Convenio Internacional para prevenir la contaminación por los Buques, MARPOL. Organización Marítima Internacional, 1973.
- [2.3] F. P. Ellis. Environmental factors influencing health and efficiency in warships. British Medical Journal, vol. 1(4551), pp. 587-592, 1948.
- [2.4] P. O. Fanger. Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. Ed. McGraw-Hill, 1970.
- [2.5] P. Gilbert y A. Bows. Exploring the scope for complementary sub-global policy to mitigate CO₂ from shipping. Energy Policy, vol. 50, pp. 613-622, 2012.
- [2.6] H. L. Hansen y G. Pedersen. Influence of occupational accidents and deaths related to lifestyle on mortality among merchant seafarers. International Journal of Epidemiology, vol. 25(6), pp. 1237-1243, 1996.
- [2.7] ILO Accident prevention on board a ship at sea and in port. An ILO code on practice (ISBN 92-2-109450-2). Organización Internacional del Trabajo, Ginebra, 1996.
- [2.8] IMO MSC/circ. 834, Guidelines for the engine-room layout, design and arrangement. Organización Marítima Internacional, 1998.
- [2.9] International Hazard Datasheets on Occupation, Ship-engineer (machinist): http://www.ilo.org/safework/cis/WCMS_193081/lang--en/index.html (Acceso septiembre 2016).
- [2.10] International Maritime Organization Guidance on fatigue: <https://www.gov.uk/government/publications/international-maritime-organization-imo-guidance-on-fatigue.html> (Acceso septiembre 2016).
- [2.11] O. C. Jensen, J. F. L. Sorensen, M. L. Canals, Y. Hu, N. Nikolic y A. A. Mozer. Non-fatal occupational injuries related to slips, trips and falls in seafaring. American Journal of Industrial Medicine, vol. 47, pp. 161-171, 2005.

- [2.12] K. Lai, C. Wong, Y. Lun y T. Cheng. Shipping design for compliance and the performance contingencies for shipping firms. *Transportation Research Part E*, vol. 55, pp. 74-83, 2013.
- [2.13] N. J. Méry y J. McGregor. Designing efficient and safe machinery spaces for merchant ships: a human factors approach. *The Bulletin Technique of Bureau Veritas*, 2009.
- [2.14] NTP 18. Estrés térmico. Evaluación de las exposiciones muy intensas: http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/001a100/ntp_018.pdf (Acceso septiembre 2016).
- [2.15] NTP 350. Evaluación del estrés térmico. Índice de sudoración requerida: http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/301a400/ntp_350.pdf (Acceso septiembre 2016).
- [2.16] J. A. Orosa y A. C. Oliveira. Assessment of work related risk criteria on board a ship as an aid to designing its onboard environment, *Journal of Marine Science and Technology*, vol. 15 (1), pp. 16-22, 2010.
- [2.17] J. A. Orosa, R. Santos y J. A. Pérez. A practical case study of the relationship between work risk prevention and fatigue at work in spanish merchant ships. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, vol. 21(5), pp. 484-492, 2011.
- [2.18] J. A. Pérez, J. A. Orosa y T. Grueiro. A three-dimensional CFD simulation study to reduce heat stress in ships. *Applied Thermal Engineering*, vol. 94, pp. 413-420, 2016.
- [2.19] S. E. Roberts y P. B. Marlow. Traumatic work-related mortality among seafarers employed in British merchant shipping: 1976-2002, *Occupational & Environmental Medicine*, vol. 62(3), pp. 172-180, 2005.
- [2.20] I. Rojon y C. Dieperink. Blowing in the wind? Drivers and barriers for the uptake of wind propulsion in international shipping. *Energy Policy*, vol. 67, pp. 394-402, 2014.
- [2.21] UNE EN 27243:1995. Ambientes calurosos. Estimación del estrés térmico del hombre en el trabajo basado en el índice WBGT (Temperatura húmeda y temperatura de globo) (ISO 7243:1989).
- [2.22] S. Xing, Y. Xinping, W. Bing y S. Xin. Analysis of the operational energy efficiency for inland river ships. *Transportation Research Part D*, vol. 22, pp. 34-39, 2013.

PARTE II

MATERIALES Y MÉTODOS

**CAPÍTULO 3:
RECURSOS
MATERIALES Y
EQUIPOS**

3.1. Breve Descripción del Buque Teneo

Para la validación de la metodología propuesta en la presente tesis doctoral se ha tomado como referencia la sala de máquinas de un buque cablero de última generación, el Teneo, construido por el Astillero Hijos de José Barreras en Vigo en los años 90 [3.1].



Fig. 3.1. Buque Cablero Teneo.

En particular, el Teneo fue diseñado y construido dentro del marco del acuerdo de colaboración MECMA (Mediterranean Cable Maintenance Agreement) suscrito por las compañías telefónicas de España, Francia e Italia en los años 90 específicamente para el tendido y mantenimiento de cables submarinos, bajo estrictas especificaciones, presentado una gran versatilidad y fiabilidad, así como una elevada precisión de posicionamiento en condiciones adversas.

Entre sus principales características, cabe destacar que el Teneo es capaz de realizar de forma autónoma tendidos de cable de 14 mm de diámetro a lo largo de más de 2000 km, operando con prácticamente cualquier tipo de vehículo sumergible [3.1].

Dicho buque innovador es considerado hoy en día un referente en los nuevos diseños de buques para aplicaciones especiales, tal como por ejemplo el Living Stone, construido en La Naval (Bilbao) para aplicaciones DEME (Dragado, Medio Ambiente e Ingeniería Marina), botado en septiembre de 2016.

La Figura 3.2 presenta un esquema general del buque, en el que se puede ver la distribución de los principales sistemas e instalaciones.

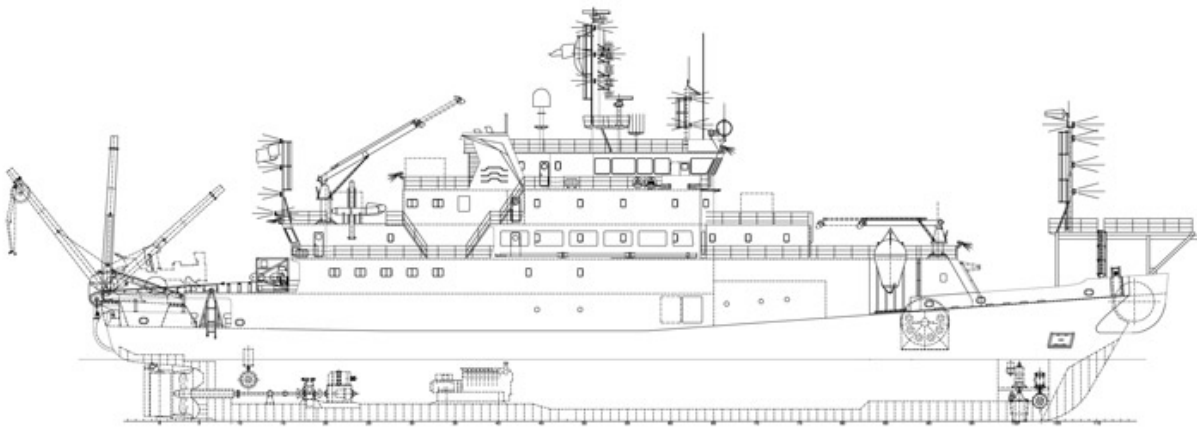


Fig. 3.2. Buque Cablero Teneo.

A modo de referencia, las principales características constructivas del buque se resumen en la Tabla 3.1 [3.1].

Tabla 3.1. Características del Buque Teneo.

BUQUE CABLERO TENEO	
IMO/ MSI:	9019602/538006679
Eslora total:	81,0 m
Eslora entre perpendiculares:	75,0 m
Manga:	14,0 m
Calado máximo:	5,76 m
Desplazamiento en lastre:	1550 Tm
Desplazamiento máximo:	3112 Tm
Capacidad de cable:	570 m ³
Velocidad máxima:	14,5 nudos
Autonomía:	4200 millas
Tripulación:	32 personas
Acomodación máxima:	60 personas

CAPÍTULO 3: RECURSOS MATERIALES Y EQUIPOS

La sala de máquinas se encuentra a popa en la cubierta inferior, justo encima de las sentinas y a proa de la hélice.

Constructivamente, tiene unas dimensiones de 10x14x5,5 m, divididos en dos partes parcialmente por una cubierta de deambulación situada a una altura de 2,8 m del suelo de la misma, tal como se muestra en la Figura 3.3.

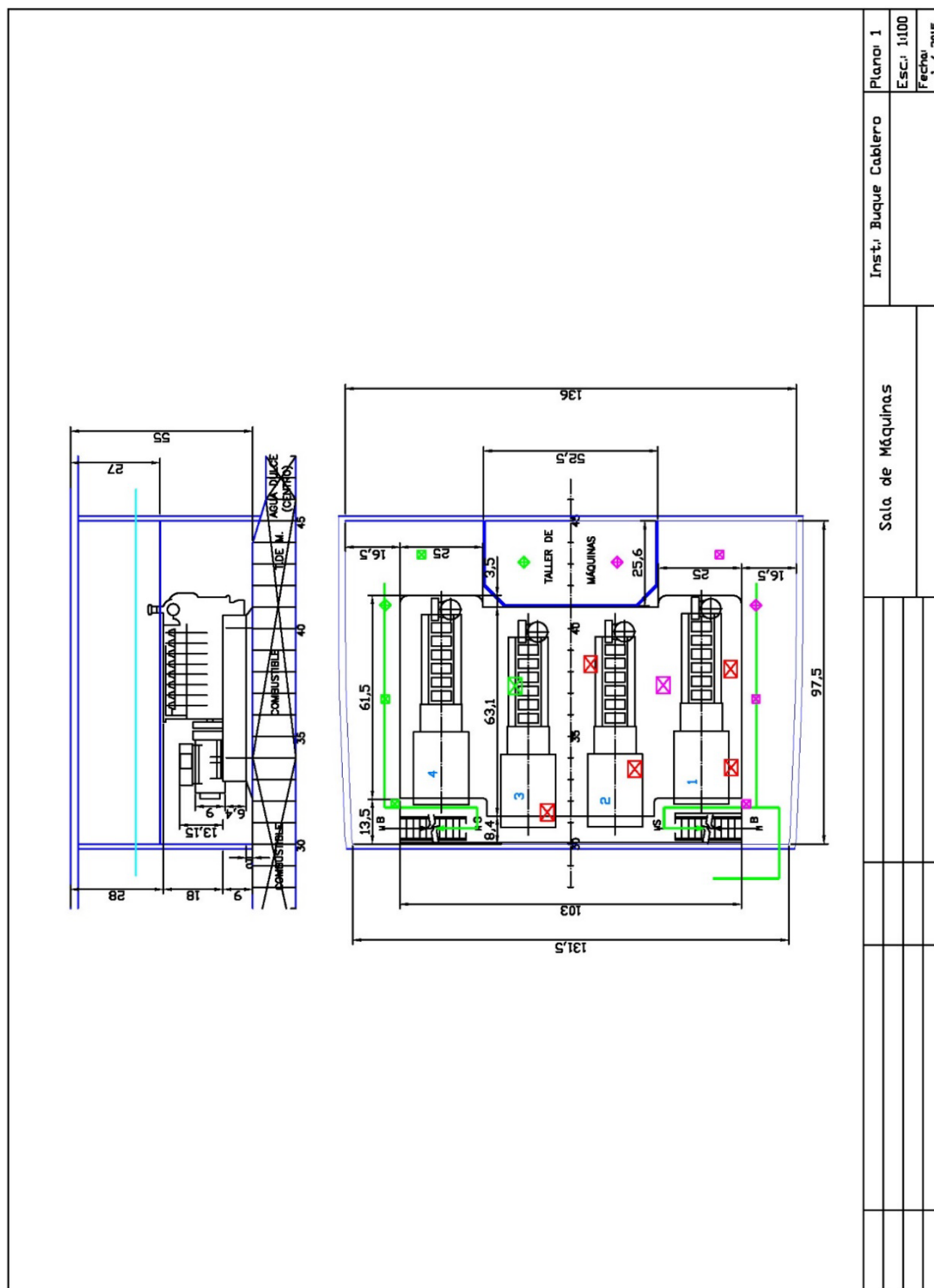


Fig. 3.3. Plano Constructivo de la Sala de Máquinas.

La sala de máquinas ha sido diseñada de acuerdo con las directrices del Plan de Eficiencia Energética en Buques (SEEMP), el cual recomienda el empleo de varios motores principales en lugar de un solo motor equivalente con el fin de reducir el consumo de energía y mejorar la eficiencia energética del buque [3.2, 3.3].

Teniendo en cuenta las ventajas intrínsecas a la propulsión eléctrica, el Teneo está propulsado eléctricamente mediante dos motores gemelos conectados al eje de la hélice, con el objeto de garantizar la máxima capacidad de maniobra y fiabilidad en el posicionamiento.

La energía eléctrica necesaria para alimentar tanto los motores como el resto de equipos auxiliares se obtiene en la sala de máquinas mediante cuatro generadores síncronos con una potencia nominal de 1190 kW cada uno, conectados respectivamente a cuatro motores diésel marinos con una potencia nominal de 1250 kW.

En navegación normal solo trabajan dos de los motores, siendo necesario los cuatro motores únicamente durante maniobras especiales de posicionamiento.

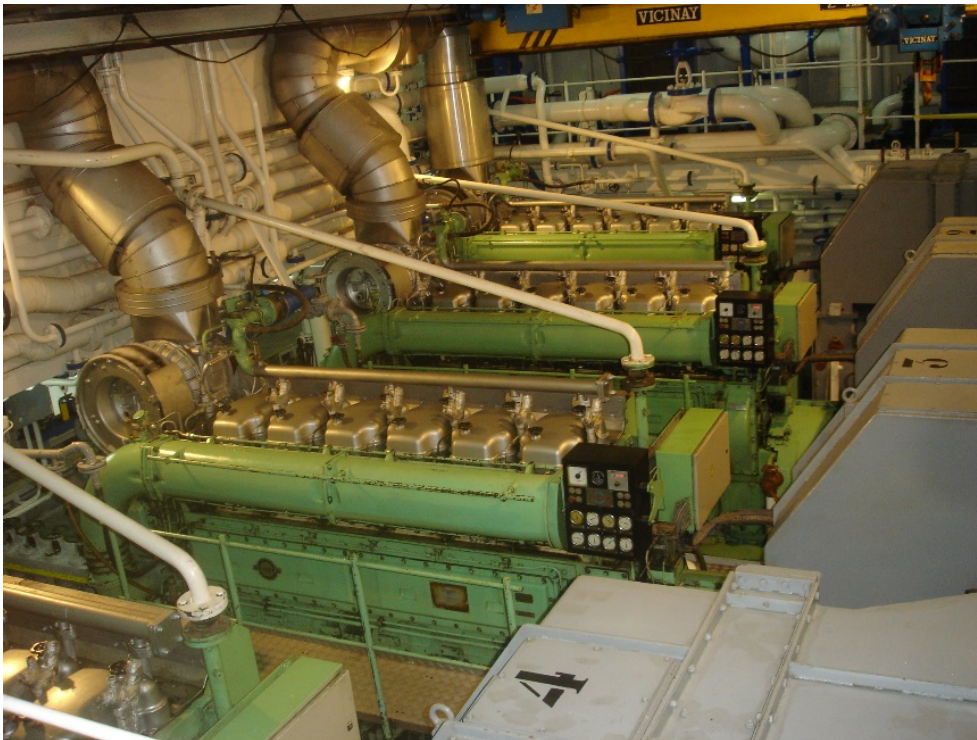


Fig. 3.4. Vista General de la Sala de Máquinas.

Como consecuencia, en la cámara de máquinas se genera una gran cantidad de calor en diferentes puntos, que debe ser evacuado al exterior por el sistema de ventilación.

En condiciones normales de navegación, todos los ventiladores funcionan de forma continua, eliminando el aire a través de tomas de ventilación situadas en las proximidades de los turbocompresores de los motores e insertando aire fresco en los lugares más relevantes, tales como las proximidades de los alternadores, entre otros.

Sin embargo, durante la estancia en puerto sólo se emplean un número reducido de ventiladores como consecuencia de la baja irradiación de calor por parte de los sistemas auxiliares.

En este sentido, en condiciones normales, el sistema de extracción renueva seis veces cada hora el volumen de aire de la sala de máquinas, aproximadamente unos 3500 m³/h, con el objeto de mantener unas condiciones ambientales mínimamente aceptables, tal como se muestra en la Figura 3.5.



Fig. 3.5. Distribución de la Ventilación en la Cámara de Máquinas.

Contigua a la sala de máquinas se encuentra la sala de control, lugar donde los ingenieros marinos realizan la monitorización de las principales variables de la sala de máquinas por medio de distintos ordenadores y equipos.

La sala de control se encuentra perfectamente acondicionada y climatizada, constituyendo un entorno cómodo que habitualmente es empleado por el personal como área de recuperación y descanso tras el trabajo en el interior de la sala de máquinas, tal y como se puede apreciar en la Figura 3.6.

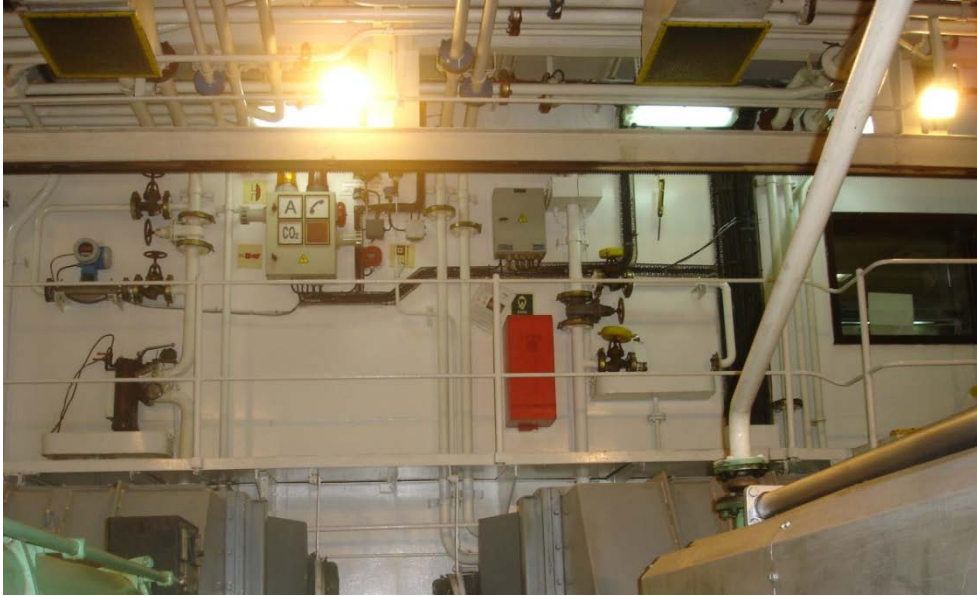


Fig. 3.6. Situación de la Sala de Control.

3.2. Medida de las Condiciones Ambientales Interiores

Para la validación experimental de la metodología propuesta en la presente tesis doctoral se han muestreado periódicamente las condiciones ambientales, tanto exteriores, como en el interior de la sala de máquinas y la sala de control del buque cablero Teneo, mientras el buque trabajaba en aguas tropicales del Mar Caribe, bajo una temperatura exterior media de 29 °C y una humedad relativa del 90% [3.14].

Entre otras variables, se ha registrado la temperatura, la humedad relativa, la presión y la velocidad del aire, con unas condiciones medias en la sala de máquinas de 35,3 °C de temperatura, una humedad relativa del 66,5% y una presión de aproximadamente 1 bar.

Por otra parte, la temperatura medida en la superficie de los motores fue de 77,5 °C y en la superficie de los alternadores de 47,8 °C, respectivamente.

Teniendo en cuenta la naturaleza de las variables medidas, para su muestreo y registro se han empleado diversos sensores, desde dataloggers para el registro de la temperatura y la humedad relativa y anemómetros para la medida de la velocidad del aire, hasta cámaras térmicas de última generación para la medición de la temperatura superficial de los motores y demás zonas de interés.

Para el muestreo de la temperatura y la humedad relativa se han empleado Dataloggers Gemini TinyTag Plus 2, concretamente el modelo TGP-4505 para el muestreo de las condiciones de temperatura y humedad exteriores y los modelos TGP-4505 y TGP-4020 para medir las condiciones interiores [3.7, 3.8].



Fig. 3.7. Dataloggers Gemini TinyTag Plus 2 TGP-4505 y TGP-4020.

En la Tabla 3.2 se indican las principales características técnicas de ambos modelos de dataloggers:

Tabla 3.2. Características Dataloggers Gemini TinyTag Plus 2.

DATALOGGERS GEMINI TGP		
Características	TGP-4505	TGP-4020
Capacidad de almacenamiento:	32000 valores	32000 valores
Aislamiento:	IP - 68	IP - 68
Peso:	165 gr	110 gr
Rango Medida Temperatura:	-25 °C ÷ +85 °C	-40 °C ÷ +125 °C
Sensor:	10K NTC	10K NTC
Tiempo de Respuesta:	3 min	3 min
Precisión:	± 0,01 °C	± 0,02 °C
Rango Medida Humedad Relativa:	0% ÷ 100%	-
Sensor:	Capacitivo	-
Tiempo de Respuesta:	40 s	-
Precisión:	± 0,3%	-

Para la medida de la presión y la velocidad del aire se ha empleado un anemómetro Testo 425, anemómetro térmico con sonda de velocidad integrada, el cual incluye medición de temperatura y empuñadura telescópica, tal como se puede observar en la Figura 3.8 [3.5].



Fig. 3.8. Anemómetro Testo 425.

En la Tabla 3.3 se indican las principales características técnicas del anemómetro empleado.

Tabla 3.3. Características Anemómetro Testo 425.

ANEMÓMETRO TESTO 425	
Características	Testo 425
Peso:	285 gr
Rango Medida Temperatura:	-20 °C ÷ +70 °C
Sensor:	10K NTC
Precisión:	± 0,1 °C
Rango Medida Velocidad:	0 m/s ÷ +20 m/s
Sonda Velocidad:	Térmica
Precisión:	± 0,01 m/s

De un modo complementario, la temperatura superficial de los motores, los alternadores, los mamparos y demás áreas de interés fueron muestreadas con una cámara termográfica Fluke TI 30, con matriz de plano focal (FPA) de

120 x 160 con microbolómetro no refrigerado y señalización de objetivo mediante láser de un punto [3.6].



Fig. 3.9. Cámara Térmica Fluke TI 30.

En la Tabla 3.4 se indican las principales características técnicas de la cámara termográfica analizada.

Tabla 3.4. Características Cámara Térmica Fluke TI 30.

CÁMARA TÉRMICA FLUKE TI 30	
Características	Fluke TI 30
Peso:	1 kg
Rango Medida Temperatura:	-10 °C ÷ +250 °C
Sensor:	Matriz de plano focal (FPA) de elemento térmico de 120 x 160 con microbolómetro no refrigerado
Campo de Visión:	17° horizontal x 12,8° vertical
Frecuencia de Refresco:	9 Hz
Precisión:	± 0,1 °C
Señalización del Objetivo:	Láser de un punto

La cámara incluye un completo software para la visualización y el tratamiento de las imágenes adquiridas, el Inside IR v 2.0.4, tal como se puede observar en la Figura 3.10.

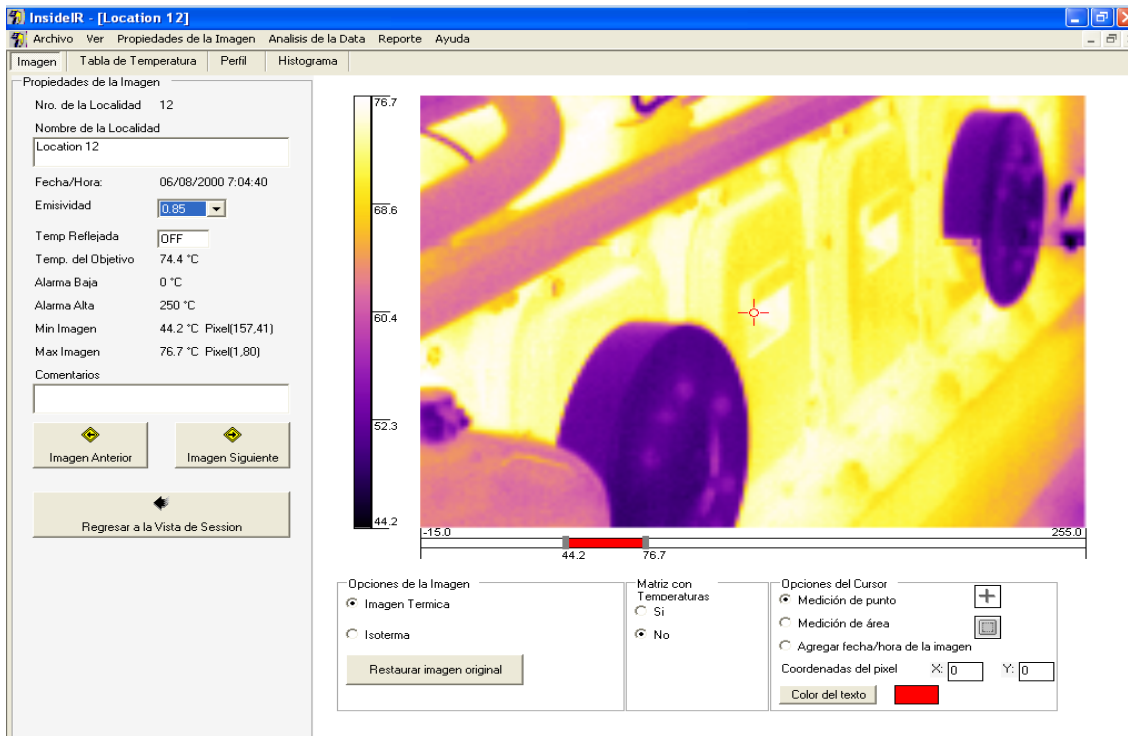


Fig. 3.10. Software de Procesado de Imágenes Fluke Inside IR.

A modo de referencia, la Figura 3.11 muestra una imagen termográfica de uno de los motores en servicio.

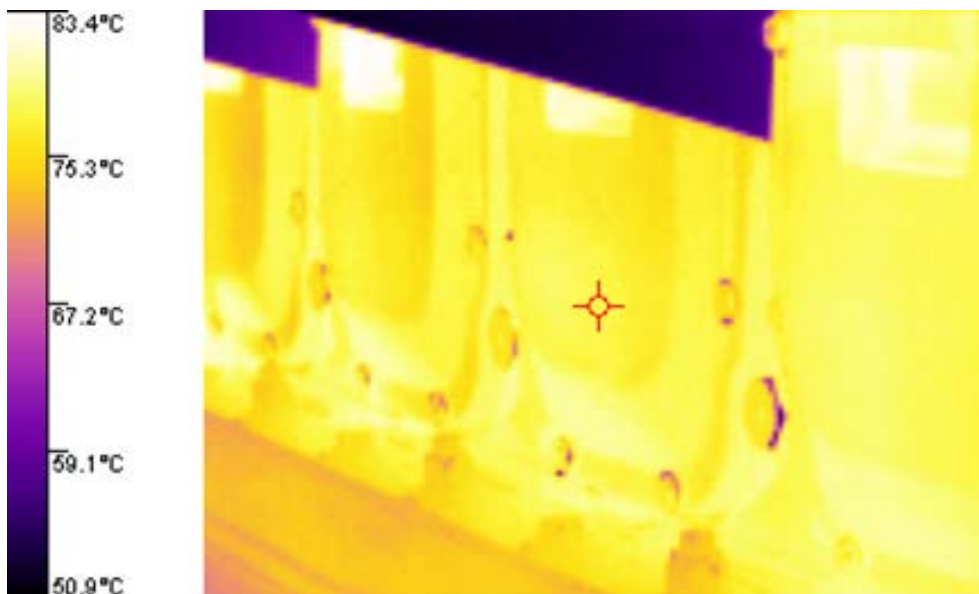


Fig. 3.11. Imagen Termográfica de la Sala de Máquinas.

3.3. Herramientas de Modelado 3D

En base a los planos constructivos originales del buque, cuyo detalle de la sala de máquinas ha sido presentado previamente en Autocad en la Figura 3.3, se ha diseñado un modelo tridimensional completo de la sala de máquinas en el programa de modelado 3D Siemens Solid Edge ST7, en el cual se han incluido los principales elementos y equipos [3.10, 3.13].

Siemens Solid Edge ST es un completo conjunto de herramientas de modelado 3D de fácil manejo que cubre eficazmente todos los aspectos del proceso de desarrollo de productos, desde el diseño en 3D, hasta la fabricación y gestión del producto final.

En la Figura 3.12 se muestra una captura general del programa de modelado 3D Siemens Solid Edge ST7, en la que se pueden ver las principales prestaciones.

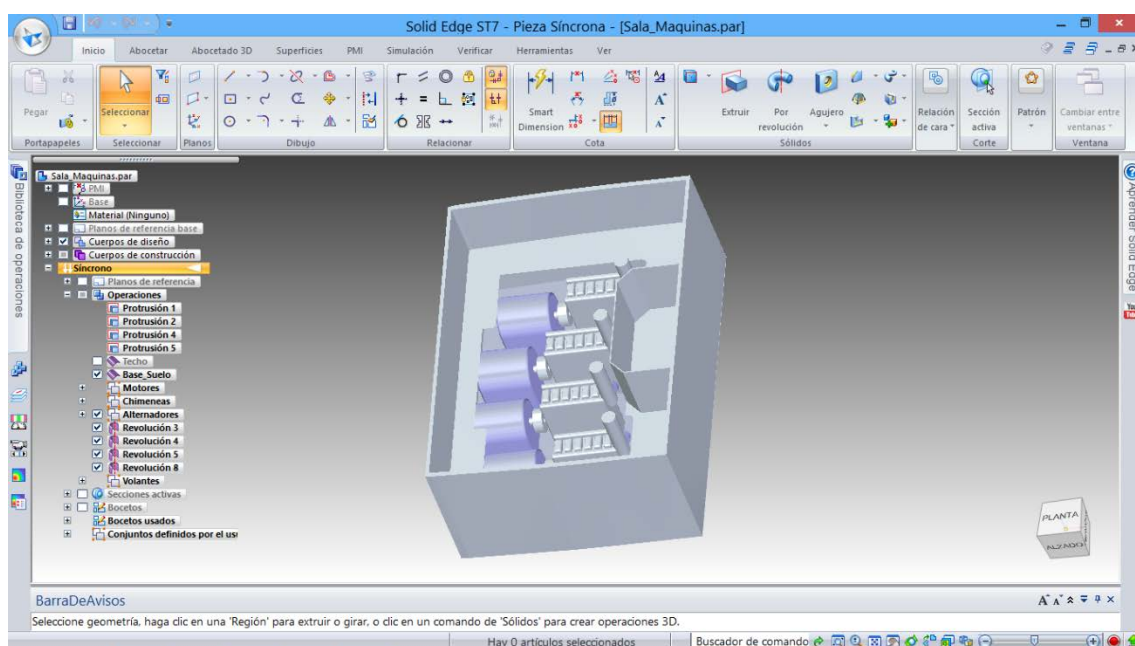


Fig. 3.12. Software de Modelado 3D Siemens Solid Edge ST7.

La sala de máquinas se encuentra a popa en la cubierta inferior, justo encima de las sentinas y a proa de la hélice.

Constructivamente, tiene unas dimensiones aproximadas de 10x14x5,5 m, divididos parcialmente en dos alturas por una plataforma de deambulación situada a una altura de 2,8 m del suelo de la misma, cuya geometría exacta se ha obtenido de los planos constructivos del buque.

Igualmente, la disposición de la sala de control, así como la distribución y dimensiones de las tomas de aire y los demás elementos de interés de la sala de máquinas se ha obtenido a partir de los planos constructivos del buque.

Como referencia, la Figura 3.13 muestra un detalle del modelo 3D de sala de máquinas, en el que, con el objeto de facilitar la visualización, se ha ocultado la cubierta superior.

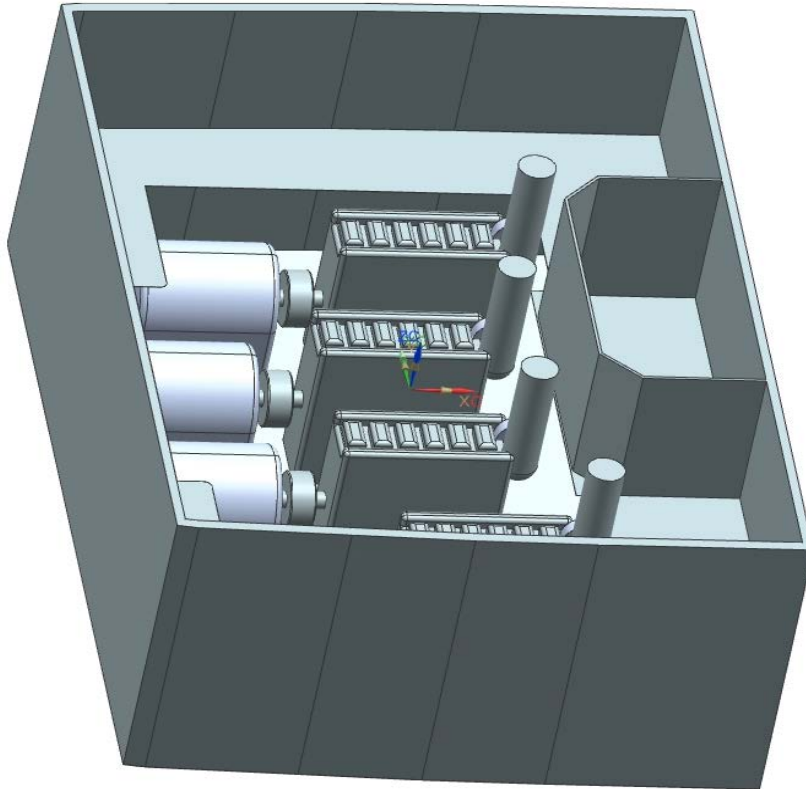


Fig. 3.13. Modelo 3D de la Sala de Máquinas.

Dicho modelo ha sido exportado al programa Siemens NX 9.0.3, en el formato estándar STEP, con el objeto de poder realizar la simulación térmica con el módulo externo CFD Mentor Graphics FloEFD para NX [3.11, 3.12].

Siemens NX ofrece una solución integrada para el diseño de productos que optimiza el proceso de desarrollo para ingenieros que necesitan ofrecer productos innovadores en entornos de colaboración.

En este sentido, a diferencia de otras aplicaciones profesionales cerradas y exclusivamente CAD, Siemens NX cuenta con múltiples herramientas externas totalmente integradas para diseño avanzado y simulación mediante elementos finitos, tanto para análisis mecánico y estructural, como térmico, entre las que cabe destacar potentes herramientas CFD, como el Mentor Graphics FloEFD.

En la Figura 3.14 se muestra una captura general del entorno de trabajo del programa de análisis Siemens NX, versión 9.0.3, en la que se pueden ver las principales prestaciones del mismo.

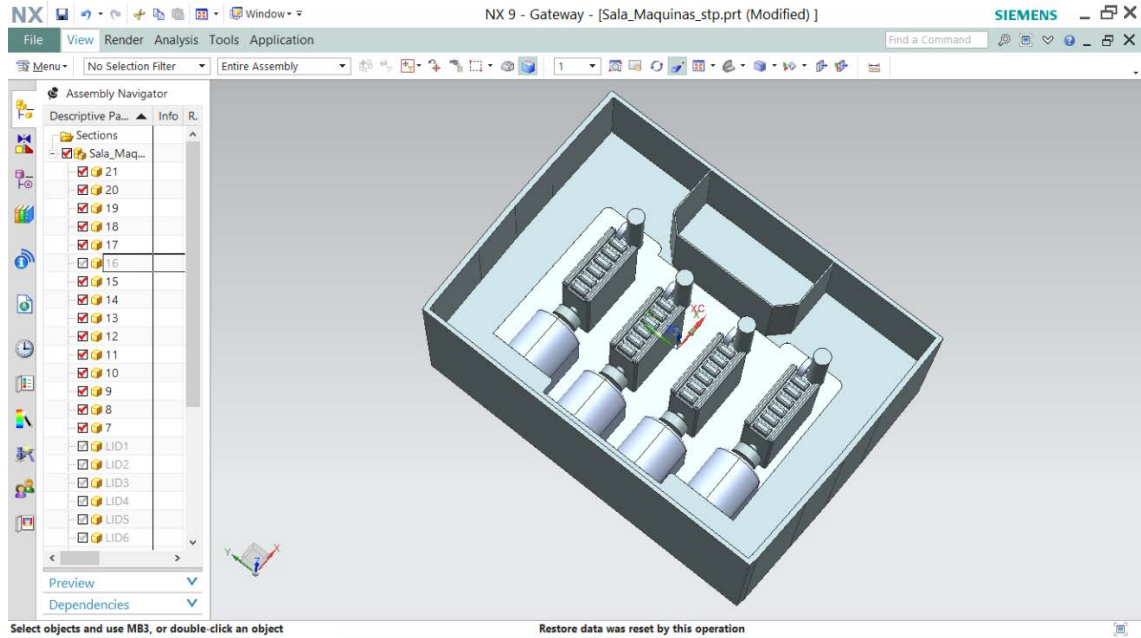


Fig. 3.14. Software de Análisis 3D Siemens NX.

3.4. Herramientas de Simulación y Análisis

Formalmente, el ambiente interior en una estancia está regido por las ecuaciones de Navier-Stokes, un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales acopladas que modelan las leyes de conservación de la materia, la cantidad de movimiento y la energía en un volumen de control [3.4].

Dichas leyes de conservación de la masa, la cantidad de movimiento y la energía, se pueden expresar en un sistema de coordenadas cartesianas en rotación con velocidad angular Ω con respecto a un eje que pase por el origen del sistema de referencia, de la siguiente forma [3.4]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \cdot u_i) = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial (\rho \cdot u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \cdot u_i \cdot u_j) + \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + F_i \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial (\rho \cdot H)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \cdot u_i \cdot H) = \frac{\partial}{\partial x_i} (u_j \cdot (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) + \frac{\partial p}{\partial t} - \tau_{ij}^R \cdot \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \cdot \varepsilon + F_i \cdot u_i + Q_H \quad (3.3)$$

Ecuaciones en las que el subíndice i representa cada una de las tres direcciones principales del sistema de coordenadas y el subíndice j denota el sumatorio en las tres coordenadas, siendo:

Ω - Velocidad angular del sistema.

u - Velocidad del fluido.

ρ - Densidad del fluido.

$F = F_{medio} + F_{gravitación} + F_{rotación}$ - Representa la fuerza distribuida por unidad de masa, debida a la resistencia del medio, F_{medio} , la gravedad, $F_{gravitación} = -\rho \cdot g$ y la rotación, $F_{rotación}$.

p - Presión.

$H = h + \frac{u^2}{2}$ - Siendo h la entalpía.

Q_H - Calor aportado por unidad de volumen. Permite modelar tanto una fuente como un sumidero de calor.

τ_{ij} - Tensor de resistencia viscosa.

τ_{ij}^R - Tensor de Reynolds.

q_i - Flujo de calor.

Dichas ecuaciones se complementan con la geometría y las condiciones de contorno específicas del problema a analizar, así como las ecuaciones de estado que modelan las propiedades y características específicas de los fluidos considerados, esencialmente la densidad, la viscosidad y la conductividad térmica y su variación en función de otros parámetros tales como la temperatura, la presión y la concentración de los distintos elementos [3.4].

También es posible analizar problemas complejos, en los que intervienen por ejemplo fluidos inelásticos no-newtonianos, considerando la dependencia de la viscosidad dinámica con el ritmo de deformación y la temperatura, o fluidos compresibles, considerando la dependencia de la densidad con la presión.

Sin embargo, como consecuencia de su elevada complejidad, este conjunto de ecuaciones solo puede ser resuelto de forma analítica para casos ideales extremadamente simples, siendo necesario recurrir a métodos numéricos de última generación, englobados en la Dinámica de Fluidos Computacional, habitualmente referidos por sus siglas en inglés, Computational Fluid Dynamics, CFD [3.4, 3.9].

El avance de los métodos computacionales en los últimos años ha sido extraordinario, tanto en términos de capacidad y velocidad de cálculo, así como en coste y fiabilidad, estimándose, como referencia, actualmente un factor de reducción de 10 cada 8 años aproximadamente [3.9].

Actualmente las técnicas CFD se han convertido en una herramienta clave para el análisis de ambientes interiores, siendo habitual su empleo no solo en el ámbito académico, sino también en el ámbito de la construcción y la ingeniería civil, existiendo actualmente en el mercado diversos programas comerciales de altas prestaciones [3.9].

En concreto, para el análisis térmico de la sala de máquinas se ha empleado el programa de análisis térmico por elementos finitos Mentor Graphics FloEFD, versión 13.2.0, integrado en el entorno Siemens NX, el cual permite analizar el comportamiento del sistema con todo detalle, considerando incluso aire húmedo [3.4, 3.11].

Entre sus amplias capacidades de simulación cabe destacar las siguientes [3.11]:

- Conducción de calor en medios fluidos, sólidos o porosos, tanto con o sin transmisión de calor entre ellos y tanto con o sin resistencia de contacto entre sólidos.
- Simulación de flujos gaseosos en regímenes subsónico, transónico y supersónico, así como flujos de aire hipersónico con efectos de disociación e ionización.
- Transferencia de calor por radiación entre sólidos opacos, absorción en sólidos semitransparentes y refracción en sólidos semi y completamente transparentes.
- Simulación de fuentes de calor volumétricas o superficiales, emulando entre otros los efectos Joule y Peltier.
- Simulación de varios tipos de conductividad térmica y eléctrica en medios sólidos.
- Simulación de la condensación de agua desde vapor y su influencia en el flujo de fluido y la transferencia de calor.
- Simulación de láminas de agua.
- Análisis de flujos gaseosos, tanto compresibles como incompresibles, incluyendo mezclas de gases y gases reales con cambio de fase, así como simulación de la humedad relativa.
- Cavitación en agua y otros líquidos.

- Combustión en mezclas de gases.
- Análisis de flujos de fluidos tanto compresibles como incompresibles, en régimen laminar y turbulento, tanto transitorio como estacionario.
- Análisis de líquidos no-newtonianos.

La Figura 3.15 muestra una captura general del entorno de trabajo del programa de análisis FloEFD integrado en Siemens NX, en la que se pueden ver las principales prestaciones del mismo.

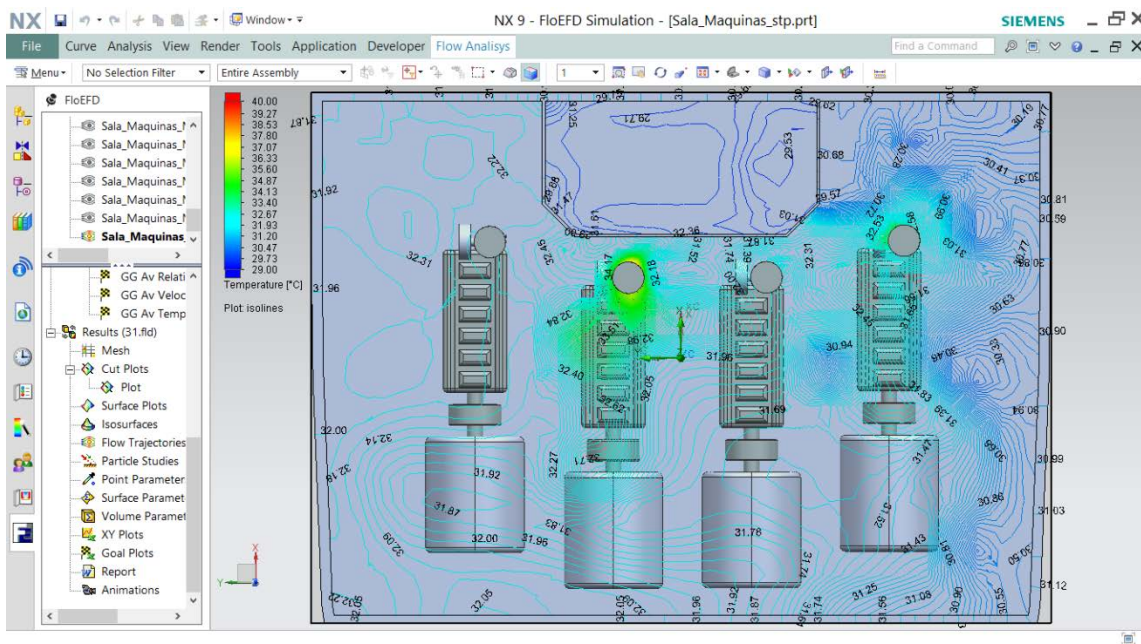


Fig. 3.15. Software de Simulación y Análisis CFD FloEFD.

3.5. Referencias

- [3.1] Base de datos del Astillero Hijos de José Barreras: <http://www.hjbarreras.es/?page=lis-offshore&idp=44> (Acceso septiembre 2016).
- [3.2] Contaminación atmosférica, eficiencia energética y emisiones de gases de efecto invernadero: <http://www.imo.org/es/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Paginas/Default.aspx> (Acceso septiembre 2016).
- [3.3] Convenio Internacional para prevenir la contaminación por los Buques. MARPOL, Organización Marítima Internacional, 1973.
- [3.4] FloEFD for NX. Technical Reference. Mentor Graphics Corporation, 2015.
- [3.5] Hoja de características técnicas anemómetro Testo 425: https://www.testo.org/resources/e8/aa/d818fe5983b6/cat_testo_425.pdf (Acceso septiembre 2016).
- [3.6] Hoja de características técnicas cámara termográfica Fluke TI 30: <http://www.fluke.com/fluke/eses/termografia/fluke-ti30.htm?pid=56183> (Acceso septiembre 2016).
- [3.7] Hoja de características técnicas Gemini Datalogger Tinytag Plus 2 TGP-4020: <http://www.interworldna.com/images/gemini/pdf/TGP-4020.pdf> (Acceso septiembre 2016).
- [3.8] Hoja de características técnicas Gemini Datalogger Tinytag Plus 2 TGP-4505: <http://www.interworldna.com/images/gemini/pdf/tgp-4505.pdf> (Acceso septiembre 2016).
- [3.9] P. V. Nielsen. Fifty years of CFD for room air distribution. Building and Environment, vol. 91, pp. 78-90, 2015.
- [3.10] Página web Autodesk: <http://www.autodesk.es/> (Acceso septiembre 2016).
- [3.11] Página web Mentor Graphics Floefd for NX: <https://www.mentor.com/products/mechanical/floefd/floefd-nx/> (Acceso septiembre 2016).
- [3.12] Página web Siemens NX: https://www.plm.automation.siemens.com/es_es/products/nx/ (Acceso septiembre 2016).

- [3.13] Página web Siemens Solid Edge ST: https://www.plm.automation.siemens.com/es_es/products/solid-edge/ (Acceso septiembre 2016).
- [3.14] J. A. Pérez, J. A. Orosa y T. Grueiro. A three-dimensional CFD simulation study to reduce heat stress in ships. Applied Thermal Engineering, vol. 94, pp. 413-420, 2016.

CAPÍTULO 4: ESTRÉS TÉRMICO Y FATIGA. NORMATIVA

4.1. Estrés Térmico y Fatiga. Consecuencias sobre el Organismo

En un entorno altamente complejo como la sala de máquinas de un buque moderno, con un gran número de instalaciones y equipos, en el cual además se genera una gran cantidad de calor, los equipos y personas que trabajan en dicha instalación están sometidas a condiciones de trabajo extremas, superándose frecuentemente los límites admisibles [4.21].

A pesar de que los efectos de la exposición del cuerpo humano a altas temperaturas son relativamente conocidos, todavía hoy existe un elevado desconocimiento acerca de las condiciones reales de trabajo en la sala de máquinas y su consecuente influencia tanto en el desempeño de las tareas ejecutadas, como fundamentalmente en la seguridad y salud del personal que allí trabaja [4.21].

La mayoría de normativa de prevención de riesgos laborales referente a estrés térmico en la cámara de máquinas, inclusive la de la propia Organización Internacional del Trabajo (OIT), se limita en muchos casos a meras recomendaciones genéricas de aplicación bastante limitada a nivel práctico [4.21].

Como consecuencia, los ingenieros marinos frecuentemente tienen que establecer sus propios tiempos de trabajo y descanso, siendo frecuente que el personal priorice acabar pronto las tareas asignadas, ante el desconocimiento del riesgo real que supone para su salud la sobreexposición a condiciones de trabajo extremas [4.21].

En una primera aproximación, en condiciones normales de bienestar o confort, el sujeto se encuentra cómodo y en perfecto equilibrio térmico con el entorno, mientras que a medida que se aleja de las condiciones óptimas, el organismo tiene que efectuar una serie de ajustes fisiológicos para mantener el equilibrio, dando lugar a una situación de sobrecarga térmica o estrés más o menos importante, según la severidad de las condiciones [4.9].

Desde un punto de vista fisiológico, el efecto más común del estrés térmico por calor es la deshidratación, acompañado en algunos casos de calambres debido a la pérdida de sales minerales como consecuencia de una sudoración excesiva y la posterior ingestión de grandes cantidades de agua fresca [4.9].

Otras alteraciones fisiológicas típicas a destacar van desde piel seca y caliente, náuseas y vómitos, hipotensión, malestar general, lividez, dolores de cabeza, elevación de la frecuencia cardíaca, aproximadamente unas 10 pulsaciones por minuto por cada grado centígrado de incremento de la temperatura interna, e incluso en casos más severos taquicardias o alteraciones

a nivel neurológico, desde vértigos y desorientación, hasta pérdidas de conocimiento [4.9].

En casos extremos, si la temperatura interna llega a superar durante un periodo de tiempo relativamente largo los 40 °C, puede llegar a producirse un síncope de calor, acompañado de convulsiones y en casos más graves, pérdida del conocimiento e incluso el estado de coma y el colapso del organismo [4.9].

Por su parte, la exposición a ambientes excesivamente fríos es igual de peligrosa, produciéndose efectos adversos equivalentes, que van desde una cierta torpeza y malestar general en el caso de exposiciones leves, la aparición de eritemas perniciosos, conocidos comúnmente como sabañones en el caso de exposiciones más prolongadas, hasta congelaciones en el caso de exposiciones más severas, llegando incluso al paro cardíaco y la muerte en el caso de situaciones extremas [4.9].

Si bien la respuesta a situaciones de sobrecarga térmica no es exactamente igual en todos los individuos, a título orientativo, se puede establecer como temperatura interna normal para un individuo sano el intervalo 36 °C a 38 °C, variando el límite máximo admisible entre los 42 °C y los 44 °C y el límite mínimo entre los 26 °C y 28 °C [4.9].

Como referencia, para personas con un sistema cardíaco normal, se debe interrumpir durante varios minutos la exposición cuando el pulso cardíaco supera las 180 pulsaciones por minuto, así como si tras un gran esfuerzo, el pulso de recuperación (1 minuto después del esfuerzo máximo) es mayor de 110 pulsaciones por minuto [4.16].

Igualmente, si la temperatura corporal interna supera los 38 °C en el caso de personal no aclimatado, si la sudoración se interrumpe y la piel se vuelve caliente y seca, o si aparecen síntomas como fuerte fatiga repentina, náuseas, vértigo o mareos, se debe interrumpir la exposición y proporcionar al individuo atención médica inmediata [4.16].

Como primera conclusión, teniendo en cuenta los riesgos, bajo ningún concepto deben desatenderse los signos o síntomas en los trabajadores que puedan relacionarse con posibles consecuencias de la sobrecarga térmica excesiva.

De todos modos, afortunadamente, los mecanismos fisiológicos de la termorregulación son muy eficientes, si bien para una correcta respuesta ante situaciones imprevistas, el organismo necesita estar entrenado y utilizar de forma habitual sus mecanismos de adaptación dentro de unos límites razonables [4.9].

En este sentido, cabe señalar que si una persona viviese en un entorno protegido, en condiciones de bienestar térmico de forma estable, perdería en gran medida su capacidad de adaptación, quedando indefenso ante posibles situaciones imprevistas [4.9].

Además, la sudoración, por ejemplo, no sólo es necesaria para lograr el equilibrio térmico, sino también como un mecanismo básico para la eliminación de residuos metabólicos y el acondicionamiento de la piel [4.9].

Igualmente, la preparación y el calentamiento previo a la realización de actividades físicas intensas, además de ayudar a prevenir lesiones musculares importantes, ayuda a incrementar la capacidad de trabajo y también el rendimiento del individuo [4.9].

Entre principales factores personales de riesgo que reducen la tolerancia individual al estrés térmico cabe destacar la edad, la obesidad, la hidratación y el consumo de medicamentos o bebidas alcohólicas, entre otros [4.16]:

- **Edad:** En principio el riesgo a sufrir las consecuencias del estrés térmico es relativamente independiente de la edad, siempre que el individuo tenga un adecuado sistema cardiovascular, respiratorio y de sudoración, unos buenos reflejos, se encuentre totalmente hidratado y en buen estado de salud. Sin embargo, generalmente las personas de mayor edad son más susceptibles a padecer problemas de control de la circulación periférica, así como a tener una menor capacidad para mantener la hidratación, incrementándose como consecuencia su vulnerabilidad al estrés térmico.
- **Obesidad:** Con carácter general, las personas con sobrepeso presentan una serie de desventajas manifiestas a la hora de enfrentarse a una situación de estrés térmico, debido al incremento del aislamiento térmico del cuerpo, las posibles deficiencias del sistema cardiovascular y la baja condición física general.
- **Hidratación:** Aun cuando el cuerpo humano pierde agua por difusión a través de la piel y por la respiración, la pérdida de agua durante una situación de estrés térmico se produce principalmente mediante la sudoración, siendo la rehidratación mediante la ingesta de agua una medida de control rápida y efectiva. En este sentido, mantener la hidratación adecuada no es fácil, debido entre otros factores a que la sensación de sed no siempre es proporcional a la pérdida de agua.

- **Medicamentos:** Diversos medicamentos pueden afectar a la respuesta del organismo frente a situaciones de estrés térmico, por ejemplo, ciertos medicamentos anticolinérgicos pueden llegar a inhibir la sudoración especialmente en individuos de mayor edad, así como algunos sedantes pueden afectar a la sensación de sed. Igualmente, otros fármacos pueden intervenir en la termorregulación, incrementando el calor metabólico y reduciendo la distribución del calor, condicionando significativamente la circulación periférica.
- **Bebidas Alcohólicas:** El alcohol produce vasodilatación periférica y diuresis, afectando a la respuesta del cuerpo al estrés térmico. En este sentido, incluso bajas dosis de alcohol reducen la capacidad de termorregulación, incluyendo los reflejos vasomotores y la sudoración, aumentando además la probabilidad de una bajada de tensión durante la exposición.

Otros factores a tener en cuenta son la aclimatación del individuo, la cual dada su relevancia será analizada en detalle posteriormente, así como la posibilidad que la persona esté embarazada, mientras que otros factores tales como el género o la procedencia étnica no presentan ninguna influencia relevante sobre la resistencia al estrés térmico [4.9].

Si bien desde un punto de vista conceptual la solución óptima sería adaptar las condiciones de trabajo, mejorando tanto el sistema de ventilación, así como el aislamiento de las principales fuentes de calor, no siempre es posible, de tal modo que entre las medidas preventivas básicas para prevenir problemas ante exposiciones a condiciones de trabajo extremas, cabe destacar las siguientes recomendaciones [4.16]:

- Proporcionar formación a los trabajadores sobre el estrés térmico y la sobrecarga térmica, así como instrucciones y procedimientos de trabajo precisos y programas de entrenamiento frecuentes.
- Fomentar entre los trabajadores expuestos la ingesta frecuente de pequeñas cantidades de agua fresca o bebida isotónica, aproximadamente un vaso cada 20 minutos.
- Permitir la autolimitación de las exposiciones y fomentar la observación y vigilancia mutua entre los trabajadores, con el fin de detectar rápidamente los primeros síntomas de sobrecarga térmica en los demás compañeros.

- Controlar y limitar especialmente la exposición de aquellos trabajadores que tomen medicación que pueda afectar al funcionamiento del sistema cardiovascular, a la presión sanguínea, a la regulación térmica, a la función renal o a la sudoración.
- Controlar la ingesta de bebidas alcohólicas.
- Fomentar el mantenimiento de la forma física de los trabajadores, controlando su peso corporal, alimentación, etc.
- Controlar especialmente a aquellos trabajadores que han permanecido durante un largo periodo sin exposición al calor y que han modificado sus parámetros de aclimatación.
- Introducir dentro de los programas de vigilancia de la salud la realización de pruebas médicas específicas con el fin de detectar precozmente la sensibilidad por exposición al calor.

4.2. Normativa de Interés

Si bien en los últimos años se han desarrollado diversas normas y recomendaciones al respecto, tanto a nivel nacional como internacional, que conviene conocer y comprender, en la mayoría de los casos, constituyen meras aproximaciones teóricas que no convergen con las condiciones reales a bordo, de tal modo que los ingenieros marinos frecuentemente tienen que establecer sus propios tiempos de trabajo y descanso [4.21].

Ante el desconocimiento del riesgo real que supone para su salud, es normal que el personal priorice acabar pronto las tareas asignadas, frente a su propia seguridad y salud, despreciando los riesgos derivados de una sobreexposición a condiciones de trabajo extremas [4.21].

En este sentido, entre la normativa nacional de obligado cumplimiento, cabe destacar la Ley de Prevención de Riesgos Laborales (Ley 31/1995, de 8 de noviembre) y la normativa derivada, fundamentalmente el Real Decreto por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo (Real Decreto 486/1997, de 14 de abril) [4.7, 4.22].

Entre las principales recomendaciones relativas a las condiciones ambientales de los lugares de trabajo del RD 486/1997, cabe señalar las siguientes disposiciones contenidas en el Anexo III [4.22]:

- La exposición a las condiciones ambientales de los lugares de trabajo no debe suponer un riesgo para la seguridad y la salud de los trabajadores.

- Asimismo, en la medida de lo posible, las condiciones ambientales de los lugares de trabajo no deben constituir una fuente de incomodidad o molestia para los trabajadores. A tal efecto, deberán evitarse las temperaturas y las humedades extremas, los cambios bruscos de temperatura, las corrientes de aire molestas, los olores desagradables, la irradiación excesiva y en particular la radiación solar directa a través de ventanas, luces o tabiques acristalados.
- En los locales de trabajo cerrados deberán cumplirse las siguientes condiciones:
 - La temperatura de los locales donde se realicen trabajos sedentarios, propios de oficinas o similares, estará comprendida entre 17 °C y 27 °C, mientras que en los locales en los que se realice trabajos ligeros, la temperatura debe estar comprendida entre 14 °C y 25 °C.
 - La humedad relativa estará comprendida entre el 30% y el 70%, excepto en los locales donde existan riesgos por electricidad estática, en los que el límite inferior será del 50%.
 - En ambientes calurosos, los trabajadores no deberán estar expuestos de forma frecuente o continuada a corrientes de aire cuya velocidad exceda los 0,5 m/s en el caso de trabajos sedentarios o 0,75 m/s en el caso de trabajos no sedentarios, límites que se podrán superar en el caso de corrientes de aire expresamente utilizadas para evitar el estrés térmico por exposiciones intensas al calor.
- La renovación mínima de aire de los locales de trabajo será de 30 m³ de aire limpio por hora y trabajador, en el caso de trabajos sedentarios en ambientes no calurosos ni contaminados por humo de tabaco y de 50 m³ en los casos restantes, a fin de evitar el ambiente viciado y los olores desagradables. En todo caso, el sistema de ventilación empleado y la distribución de las entradas de aire limpio y las salidas de aire viciado deberán asegurar una efectiva renovación del aire del local de trabajo.
- Las condiciones ambientales de los locales de descanso, los locales para el personal de guardia, los servicios higiénicos, los comedores y los locales de primeros auxilios deberán responder al uso específico de estos locales y ajustarse en todo caso a lo dispuesto anteriormente.

A nivel nacional, además de la legislación anterior de obligado cumplimiento, cabe destacar como referencia básica las recomendaciones del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, INSHT, el cual depende actualmente del Ministerio de Empleo y Seguridad Social [4.20].

Entre el innumerable conjunto de normas y recomendaciones relacionadas con las condiciones ambientales en el trabajo y el estrés térmico, cabe citar de forma no exhaustiva las siguientes Notas Técnicas de Prevención, NTP, la mayoría empleadas asiduamente en la presente tesis doctoral:

- NTP 18: Estrés térmico. Evaluación de las exposiciones muy intensas [4.10].
- NTP 74: Confort térmico. Método de Fanger para su evaluación [4.11].
- NTP 322: Valoración del riesgo de estrés térmico: índice WBGT [4.12].
- NTP 323: Determinación del metabolismo energético [4.13].
- NTP 350: Evaluación del estrés térmico. Índice de sudoración requerida [4.14].
- NTP 779: Bienestar térmico: criterios para ambientes térmicos confortables: [4.15].
- NTP 922: Estrés térmico y sobrecarga térmica: evaluación de los riesgos (I) [4.16].
- NTP 923: Estrés térmico y sobrecarga térmica: evaluación de los riesgos (II) [4.17].

Cabe destacar que muchas de las Notas Técnicas de Prevención citadas anteriormente tienen su base teórica en normas internacionales ISO, lo cual les aporta un adecuado soporte formal, siendo común su uso no solo a nivel nacional, sino también en el resto de los países de lengua castellana.

A nivel internacional, entre el innumerable conjunto de normas y recomendaciones relacionadas con las condiciones ambientales en el trabajo y el estrés térmico, cabe citar de forma no exhaustiva las siguientes normas ISO, la mayoría transpuestas directamente a normas nacionales UNE y/o a normas europeas EN, muchas de ellas empleadas asiduamente en la presente tesis doctoral:

- UNE EN ISO 7726:2002. Ergonomía de los ambientes térmicos. Instrumentos de medida de las magnitudes físicas [4.23].

- UNE EN ISO 7730:2006. Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local [4.24].
- UNE EN ISO 7933:2005. Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del estrés térmico mediante el cálculo de la sobrecarga térmica estimada [4.25].
- UNE EN ISO 8996:2005. Ergonomía del ambiente térmico. Determinación de la tasa metabólica [4.26].
- UNE EN ISO 9886:2004. Ergonomía. Evaluación de la sobrecarga térmica mediante mediciones fisiológicas [4.27].
- UNE EN ISO 9920:2009. Ergonomía del ambiente térmico. Determinación del aislamiento de la vestimenta. Estimación del aislamiento térmico y de la resistencia a la evaporación de un conjunto de ropa [4.28].
- UNE EN 27243:1995. Ambientes calurosos. Estimación del estrés térmico del hombre en el trabajo basado en el índice WBGT (Temperatura húmeda y temperatura de globo) (ISO 7243:1989) [4.29].

Específicamente en el ámbito marítimo, además de las normas ISO cabe destacar las recomendaciones de la Organización Marítima Internacional, IMO, principalmente la guía sobre fatiga y la circular IMO MSC 834, sobre el diseño de la sala de máquinas y las recomendaciones de la Organización Internacional del Trabajo, básicamente la guía de prevención de accidentes a bordo y la tabla de riesgos para ingenieros marítimos, entre otras [4.3, 4.4, 4.5, 4.6].

4.3. Tiempos de Exposición Admisibles. NTP 350

La NTP 350, transposición directa de la norma internacional UNE-EN ISO 7933:2005, presenta una completa metodología para analizar las condiciones de trabajo en ambientes extremos, tales como el de la sala de máquinas de un buque moderno y estimar el máximo tiempo que un operario podría trabajar en su interior de forma segura [4.14, 4.21, 4.25].

Dicha metodología se basa en la comparación de los valores requeridos de humedad de la piel, w_{req} y de sudoración, Sw_{req} , en función de las condiciones de trabajo y los máximos valores aceptables sin peligro para el operario, valores que se obtienen directamente a partir de la evaporación requerida, E_{req} y la máxima evaporación permitida, $E_{máx}$ [4.14].

La evaporación requerida se puede estimar directamente a partir del balance energético del cuerpo humano, teniendo en cuenta que para que el organismo alcance el equilibrio térmico con el entorno, el calor total acumulado, S , ha de ser nulo [4.14].

En términos de balance, alcanzar el equilibrio térmico con el entorno requiere que el calor generado por el organismo a través del metabolismo, más el calor absorbido del entorno, sea igual a la suma de la energía consumida en forma de trabajo mecánico y el calor disipado al medio, tanto directamente por conducción, convección y radiación, como indirectamente mediante la sudoración [4.14].

$$S = (M - W) - (K + C + R) - (C_{resp} + E_{resp}) - E_{sud} \quad (4.1)$$

Ecuación en la que todos los términos se expresan en expresan por unidad de superficie y tiempo, es decir en $\frac{W}{m^2}$:

S - Calor total acumulado por el organismo.

E_{sud} - Energía disipada por sudoración.

M - Producción de energía metabólica (Metabolic rate), el cual representa la energía requerida por el organismo para realizar las tareas consideradas. Típicamente se expresa en Met, el cual equivale a una generación de calor de 58 W por m^2 de superficie del cuerpo.

W - Trabajo útil.

K - Calor intercambiado por conducción.

C - Calor intercambiado por convección.

R - Calor intercambiado por radiación.

C_{resp} - Calor intercambiado por convección respiratoria.

E_{resp} - Calor latente intercambiado por la respiración.

Cabe señalar que, entre otros factores, estos valores están influidos por el vestuario, por cuanto la ropa actúa a modo de aislamiento, reduciendo las pérdidas de calor al entorno. Para cuantificar el grado de aislamiento de una determinada prenda, generalmente se emplea como una unidad el Clo, la cual en términos de resistencia térmica es equivalente a $0,155 \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$.

Teniendo en cuenta que para mantener el equilibrio del organismo el calor acumulado, S , debe ser nulo y que en condiciones normales se puede despreciar tanto el trabajo útil, W , como el calor intercambiado por conducción, K , la sudoración requerida, E_{req} , se calcula directamente como [4.14]:

$$E_{req} = M - (C + R) - (C_{resp} + E_{resp}) \quad (4.2)$$

Como referencia, para la estimación de la producción de energía metabólica, M , se puede usar la NTP 323, Determinación del metabolismo energético, mientras que los términos de calor intercambiado por convección, C y de calor intercambiado por radiación, R , se calculan directamente mediante las siguientes expresiones [4.13, 4.14]:

$$C = h_c \cdot F_{cl} \cdot (T_{sk} - T_a) \quad (4.3)$$

$$R = h_r \cdot F_{cl} \cdot (T_{sk} - T_a) \quad (4.4)$$

En donde:

h_c - Coeficiente de intercambio de calor por convección $\left[\frac{W}{m^2} \right]$.

$F_{cl} = \frac{1}{\left[\frac{1}{1 + 1,97 \cdot I_{cl}} + (h_c + h_r) \right]} \cdot I_{cl}$ - Factor adimensional de reducción de

los intercambios de calor sensible debidos al atuendo.

I_{cl} - Aislamiento térmico intrínseco del atuendo.

T_{sk} - Temperatura cutánea [°C].

T_a - Temperatura del aire [°C].

T_r - Temperatura radiante [°C].

$h_r = \sigma \cdot \varepsilon_{sk} \cdot \frac{A_r}{A_{DU}} \cdot \frac{[(T_{sk} + 273,15)^4 - (T_r + 273,15)^4]}{(T_{sk} - T_a)}$ - Coeficiente de radiación $\left[\frac{W}{m^2} \right]$.

$\frac{A_r}{A_{DU}}$ - Fracción de superficie cutánea participante en el intercambio de calor por radiación.

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4} - \text{Constante de Stefan Boltzman.}$$

ε_{sk} - Emisividad cutánea.

El aislamiento térmico intrínseco del atuendo, I_{cl} , se puede estimar de acuerdo con la Tabla 4.1 [4.14].

Tabla 4.1. Valores Típicos de Aislamiento Térmico Intrínseco.

 AISLAMIENTO TÉRMICO INTRÍNSECO 	
Tipo de Prenda	Aislamiento Térmico I_{cl}
Ropa Interior	
Calzoncillos	0,03
Calzoncillos largos	0,10
Camiseta de tirantes	0,04
Camiseta de manga corta	0,09
Camiseta de manga larga	0,12
Sujetadores y bragas	0,03
Camisas y Blusas	
Manga corta	0,15
Ligera, manga corta	0,20
Normal, manga larga	0,25
Camisa de franela, manga larga	0,30
Blusa ligera, manga larga	0,15
Pantalones	
Corto	0,06
Ligero	0,20
Normal	0,25
Franela	0,28
Vestidos - Faldas	
Falda ligera (verano)	0,15
Falda gruesa (invierno)	0,25
Vestido ligero, manga corta	0,20
Vestido de invierno, manga larga	0,40
Mono de trabajo	0,55
Pullover	
Chaleco sin mangas	0,12
Pullover ligero	0,20
Pullover medio	0,28
Pullover grueso	0,35

AISLAMIENTO TÉRMICO INTRÍNSECO	
Tipo de Prenda	Aislamiento Térmico I_{cl}
Chaqueta	
Chaqueta ligera de verano	0,25
Chaqueta normal	0,35
Bata de trabajo (guardapolvo)	0,30
Prendas forradas	
Mono de trabajo	0,90
Pantalón	0,35
Chaqueta	0,40
Chaleco	0,20
Prendas exteriores de abrigo	
Abrigo	0,60
Chaqueta larga	0,55
Parca	0,70
Mono forrado	0,55
Diversos	
Calcetines	0,02
Calcetines gruesos cortos	0,05
Calcetines gruesos largos	0,10
Medias de nylon	0,03
Zapatos con suela delgada	0,02
Zapatos con suela gruesa	0,04
Botas	0,10
Guantes	0,05

El calor intercambiado por convección respiratoria, C_{resp} y el calor latente intercambiado por la respiración, E_{resp} , se pueden calcular en base a las siguientes expresiones para un individuo normal y una temperatura de aire expirado de aproximadamente 35 °C [4.14]:

$$C_{resp} = 0,0014 \cdot M \cdot (35 - T_a) \quad (4.5)$$

$$E_{resp} = 0,0173 \cdot M \cdot (5,624 - p_a) \quad (4.6)$$

A la hora de estimar el máximo tiempo que un individuo puede estar bajo unas ciertas condiciones, de acuerdo con la norma, se obtienen dos valores límites, uno derivado del máximo tiempo admisible debido a la acumulación de

calor, $t_{m\acute{a}x,ac}$ y otro debido al límite de deshidratación del organismo, $t_{m\acute{a}x,dh}$, empleándose a nivel práctico el menor de ambos [4.14].

La diferencia entre la evaporación requerida, E_{req} y la máxima evaporación permitida, $E_{m\acute{a}x}$, permite estimar la acumulación de calor por parte del organismo, la cual de acuerdo con la norma no debe superar 1 °C, de donde se puede estimar el máximo tiempo que el individuo puede estar bajo dichas condiciones sin peligro, desde el punto de vista de la elevación de temperatura, $t_{m\acute{a}x,ac}$ [4.14]:

$$t_{m\acute{a}x,ac} = 60 \cdot \frac{Q_{m\acute{a}x}}{E_{req} - E_{m\acute{a}x}} \quad (4.7)$$

Siendo $Q_{m\acute{a}x}$ el calor máximo que puede acumular un individuo.

La máxima evaporación permitida, $E_{m\acute{a}x}$, se puede estimar bajo la hipótesis de piel mojada en base a la siguiente expresión [4.14]:

$$E_{m\acute{a}x} = \frac{p_{sk} - p_a}{R_t} \quad (4.8)$$

Siendo:

p_{sk} - Presión de saturación de vapor de agua a la temperatura de la piel [kPa].

p_a - Presión parcial del vapor de agua a la temperatura ambiente [kPa].

R_t - Resistencia evaporativa total de la capa limitante de aire y atuendo de vestir.

De un modo similar, se calcula el tiempo máximo que puede estar el individuo sin superar el límite de deshidratación establecido, $t_{m\acute{a}x,dh}$, teniendo en cuenta que de acuerdo con la norma, la pérdida de agua del organismo no puede superar el 6% del peso corporal del individuo [4.14]:

$$t_{m\acute{a}x,dh} = 60 \cdot \frac{D_{m\acute{a}x}}{Sw_{req}} \quad (4.9)$$

Siendo $D_{m\acute{a}x}$ la máxima deshidratación admisible y Sw_{req} la sudoración requerida, la cual en ningún caso debe superar la sudoración máxima recomendada por la norma, $Sw_{m\acute{a}x}$.

La sudoración requerida, Sw_{req} , se puede estimar en función de la evaporación requerida, E_{req} y la humedad de la piel requerida, w_{req} , en base a la siguiente expresión [4.14]:

$$Sw_{req} = \frac{E_{req}}{\left(1 - \frac{w_{req}^2}{2}\right)} \quad (4.10)$$

Cabe recordar que de acuerdo con las recomendaciones de la NTP 350, si como consecuencia de la exposición al ambiente extremo el individuo supera el límite de deshidratación establecido, $t_{máx,dh}$, lo cual implicaría una pérdida de agua superior al 6% de su peso corporal, el individuo debería rehidratarse, descansar el tiempo necesario en un entorno controlado y no volver a exponerse a condiciones de estrés térmico durante el resto de la jornada [4.14].

Como valores de referencia para la interpretación de los resultados, la NTP 350 emplea los valores propuestos por la norma ISO 7933, los cuales establecen dos niveles, uno de alarma y otro de peligro, tanto para individuos aclimatados como no aclimatados, valores que se resumen en la Tabla 4.2 [4.14].

Tabla 4.2. Valores de Referencia.

VALORES DE REFERENCIA				
Variable	Sujeto no Aclimatado		Sujeto Aclimatado	
	Alarma	Peligro	Alarma	Peligro
Calor máximo $Q_{máx} \left[\frac{W \cdot h}{m^2} \right]$	50	60	50	60
Sudoración máxima $Sw_{máx} \left[\frac{W \cdot h}{m^2} \right]$	200	250	300	400
Deshidratación máxima $D_{máx} \left[\frac{W \cdot h}{m^2} \right]$	1000	1250	1500	2000
Humedad máxima de la piel $w_{máx}$	0,85	0,85	1	1

La aclimatación es un proceso complejo en el que participan el aparato circulatorio, aumentando el gasto cardíaco al reducir la frecuencia cardíaca máxima, el sistema endocrino, modificando los niveles de determinadas hormonas (fundamentalmente aumenta la aldosterona) y las glándulas sudoríparas, segregando más cantidad de sudor, pero con menos sodio, ayudando así a incrementar la máxima cantidad de calor que es capaz de disipar el organismo [4.16].

Este ajuste fisiológico se produce de forma progresiva, incrementándose paulatinamente la máxima duración admisible de la exposición al calor, lo que hace posible que una persona trabaje eficazmente bajo condiciones que serían insoportables previamente a la aclimatación [4.16].

La aclimatación se logra en períodos breves de tiempo, típicamente entre 5 y 10 días, recomendándose que la exposición se limite a un tiempo de exposición del 50% del total durante el primer día, continuándose con incrementos diarios del 10%, hasta alcanzar al sexto día el 100% de la exposición diaria.

Sin embargo, los efectos de la aclimatación se pierden fácilmente después de un período de ausencia del trabajo relativamente corto, en torno a 2 semanas, situación que se produce frecuentemente en buques como consecuencia de vacaciones y permisos, al igual que como consecuencia de una baja laboral prolongada.

Como consecuencia, en el caso de entornos de trabajo, generalmente es necesario considerar ambas situaciones, calculando el tiempo máximo admisible tanto para personal aclimatado como no aclimatado.

De un modo complementario, para estimar la severidad del estrés térmico, además de los límites indicados en la Tabla 4.2, es frecuente el empleo del índice IST de sobrecarga térmica de Belding y Hatch, también conocido como índice ISC de sobrecarga calórica, en base a la proporción entre la evaporación requerida, E_{req} y la máxima evaporación permitida, $E_{máx}$ [4.1]:

$$IST = \frac{E_{req}}{E_{máx}} \cdot 100 \quad (4.11)$$

Como referencia, en la Tabla 4.3 se presenta una escala de valoración del estrés a partir del índice IST, en función de las implicaciones fisiológicas para exposiciones diarias derivadas a una jornada laboral típica de 8 horas [4.1].

Tabla 4.3. Escala para la Valoración del Índice IST.

VALORES DE REFERENCIA ÍNDICE IST	
IST	Implicaciones Fisiológicas
-20 ÷ -10	Suave estrés térmico por frío. Constituye la situación típica en las áreas de descanso donde los trabajadores se recuperan de la exposición al calor.
0	Situación neutra. Ausencia de estrés.
10 ÷ 30	Estrés térmico suave a moderado. En trabajos pesados puede esperarse un ligero descenso del rendimiento.
40 ÷ 60	Estrés térmico intenso. Supone un riesgo para la salud en el caso de individuos no aclimatados.
80 ÷ 90	Estrés térmico extremo. Supone un riesgo importante para la salud de los trabajadores.
100	Máximo estrés tolerable diariamente por individuos sanos aclimatados.

4.4. Tiempos de Recuperación y Descanso. NTP 18

La norma NTP 18, en base a los trabajos de McKarns y Brief, permite calcular el tiempo mínimo necesario que debe descansar un individuo en un entorno controlado para recuperarse de una exposición prolongada a condiciones extremas de temperatura, tales como las consideradas por la NTP 350 [4.8, 4.10, 4.14].

En realidad, la NTP 18 permite calcular no solo los preceptivos períodos de reposo que deben seguir a la exposición a condiciones extremas antes de que el individuo pueda recomenzar el trabajo, sino que también permite obtener una buena estimación del tiempo máximo que un trabajador puede permanecer en entornos extremos [4.10].

De todos modos, si bien hasta hace relativamente poco tiempo ha sido uno de los procedimientos más empleados en la práctica para dicho propósito, en los últimos años ha sido sustituida paulatinamente por la NTP 350, por cuanto sus estimaciones son más fiables y precisas [4.16].

En particular, el método propuesto por la NTP 18 es particularmente apropiado para situaciones muy agresivas, con un tiempo máximo de permanencia inferior a 30 minutos, perdiendo sensibilidad para exposiciones menos severas [4.10].

En base a estas consideraciones y teniendo en cuenta las recomendaciones de la NTP 922, durante la presente tesis doctoral se ha empleado la NTP 350 para estimar los tiempos admisibles de trabajo en la sala de máquinas y la NTP 18 para la estimación de los correspondientes tiempos de descanso en un entorno controlado, tal como la sala de control [4.16, 4.21].

De acuerdo con la NTP 18, el tiempo de reposo requerido, t_{rep} , se calcula en base al Índice de Estrés Térmico propuesto por Belding y Hatch, a partir de la diferencia entre el calor que debe evacuar el individuo por evaporación, E_{req} y el máximo calor que realmente puede disipar, $E_{máx}$ [4.1, 4.8, 4.10]:

$$t_{rep} = \frac{c_p \cdot m \cdot \Delta T}{E_{req} - E_{máx}} \quad (4.12)$$

Siendo:

$$c_p = 0,82 \frac{kcal}{kg \cdot ^\circ C} \text{ - Calor específico medio del organismo.}$$

m - Masa del individuo. Como valor de referencia típicamente se considera 70 kg.

ΔT - Incremento de temperatura admisible, el cual de acuerdo con la norma no debe superar 1 °C.

Siguiendo un razonamiento análogo al efectuado en la NTP 350, el calor que debe evacuar el individuo por evaporación, E_{req} , se puede calcular directamente a partir de la ecuación 4.1, teniendo en cuenta que para mantener el equilibrio del organismo, el calor acumulado, S , debe ser nulo y que en condiciones normales se puede despreciar tanto el trabajo útil, W , como el calor intercambiado por conducción, K [4.10, 4.14].

Además, la NTP 18 también desprecia el calor intercambiado por convección respiratoria, C_{resp} y el calor latente intercambiado por la respiración, E_{resp} , de tal modo que la evaporación requerida, E_{req} , se calcula directamente como [4.14]:

$$E_{req} = M - (C + R) \quad (4.13)$$

La máxima evaporación permitida, $E_{m\acute{a}x}$, se puede estimar bajo la hipótesis de piel mojada en base a la expresión 4.8 presentada anteriormente, suponiendo generalmente una temperatura de la piel de 35 °C [4.14].

En este sentido, cabe señalar que la temperatura interna típica para un individuo sano oscila aproximadamente entre 36,5 °C y 37 °C y de acuerdo con la norma, no debe variar más de 1 °C con respecto a este valor como consecuencia de la exposición a condiciones extremas.

Sin embargo, la temperatura de la piel varía de forma considerable. Así, la temperatura de la piel de un hombre en actividad moderada y en un ambiente confortable se sitúa alrededor de 32 °C, mientras que en una situación de estrés térmico la temperatura de la piel puede ascender notablemente, de tal modo que la NTP 18 recomienda considerar en los cálculos un valor de temperatura de la piel de 35 °C [4.10].

Cabe destacar que en sus orígenes la NTP 18 fue concebida para su aplicación de forma gráfica, mediante el empleo de los nomogramas de McKarns y Brief, para la estimación de los distintos parámetros analizados, si bien en la actualidad generalmente los distintos parámetros se calculan directamente en base a las expresiones anteriores [4.8, 4.10].

En este sentido, es necesario señalar que si se emplean los nomogramas incluidos en la NTP 18, los valores obtenidos de evaporación requerida, E_{req} y máxima evaporación permitida, $E_{m\acute{a}x}$, vienen expresados en kcal/h, de tal modo que el tiempo de reposo calculado, t_{rep} , vendría expresado en horas.

Igualmente, si se emplean los nomogramas, es necesario manejar diversos valores de temperatura, concretamente la temperatura de bulbo seco o temperatura seca, la temperatura de rocío y la temperatura de globo, cuyas definiciones, entre otras de interés se resumen a continuación [4.19]:

- Temperatura de bulbo seco: Representa la típica medida de temperatura del aire. Teniendo en cuenta que el bulbo del termómetro está seco, este valor no varía con el contenido de humedad del aire.
- Temperatura de bulbo húmedo: Representa la temperatura registrada por un termómetro que tiene su bulbo envuelto en un paño o muselina humedecida en agua.

- Cabe destacar que aunque en el mercado existen equipos que permiten medir directamente la temperatura de rocío, por su elevado coste, su uso no está generalizado, siendo habitual estimar la temperatura de rocío en base a la temperatura seca y la temperatura de bulbo húmedo, tal como se indica en la Tabla 4.3 [4.10].

Temperatura seca.																														Temperatura húmeda
10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60					
10	8,1	6	3,6	8,8	-2,7																						10			
	12	10,3	8,5	6,5	4,1	1,4	-1,9																				12			
		14	12,5	10,9	9,1	7,2	4,9	2,3	-0,7																		14			
			16	14,7	13,2	11,8	10,1	8,2	8,1	3,7	0,9	-2,5															16			
				18	16,7	15,6	14,2	12,8	11,2	9,5	7,5	5,4	2,9	-0,1													18			
					20	18,9	17,8	16,7	15,5	14,1	12,6	11	9,2	7,3	5,1	2,5	-0,5										20			
						22	21,1	20,1	19,1	18	16,8	15,5	14,2	11,2	8,4	7,5	5,3	2,8	-0,2								22			
							24	23,1	22,3	21,4	20,4	18,3	17,2	16	14,2	13,2	11,7	10	8,1	6	3,6	0,8	-2,6				24			
								26	25,3	24,5	23,7	22,8	21,9	21	20	19	17,9	16,7	15,4	14,1	12,6	11	9,2	7,3	5,1	26				
									28	27,3	26,7	25,9	25,2	24,4	23,5	22,7	21,8	20,9	19,9	18,8	17,7	16,5	15,2	13,9	12,4	28				
										30	29,4	28,8	28,1	27,4	26,8	26	25,3	24,5	23,7	22,9	22	21	20	19	12,9	30				
											32	31,5	30,9	30,3	29,7	29,1	28,5	27,8	27,1	26,4	25,7	24,9	24,1	23,3	22,4	32				
												34	33,5	33	32,5	31,9	31,4	30,9	30,2	29,6	29	28,4	27,7	27	26,3	34				
													36	35,5	35,1	34,6	34,1	33,6	33,1	32,6	32,1	31,5	31	30,4	29,8	36				
														38	37,6	37,2	36,7	36,3	35,9	35,4	35	34,5	34	33,5	33					

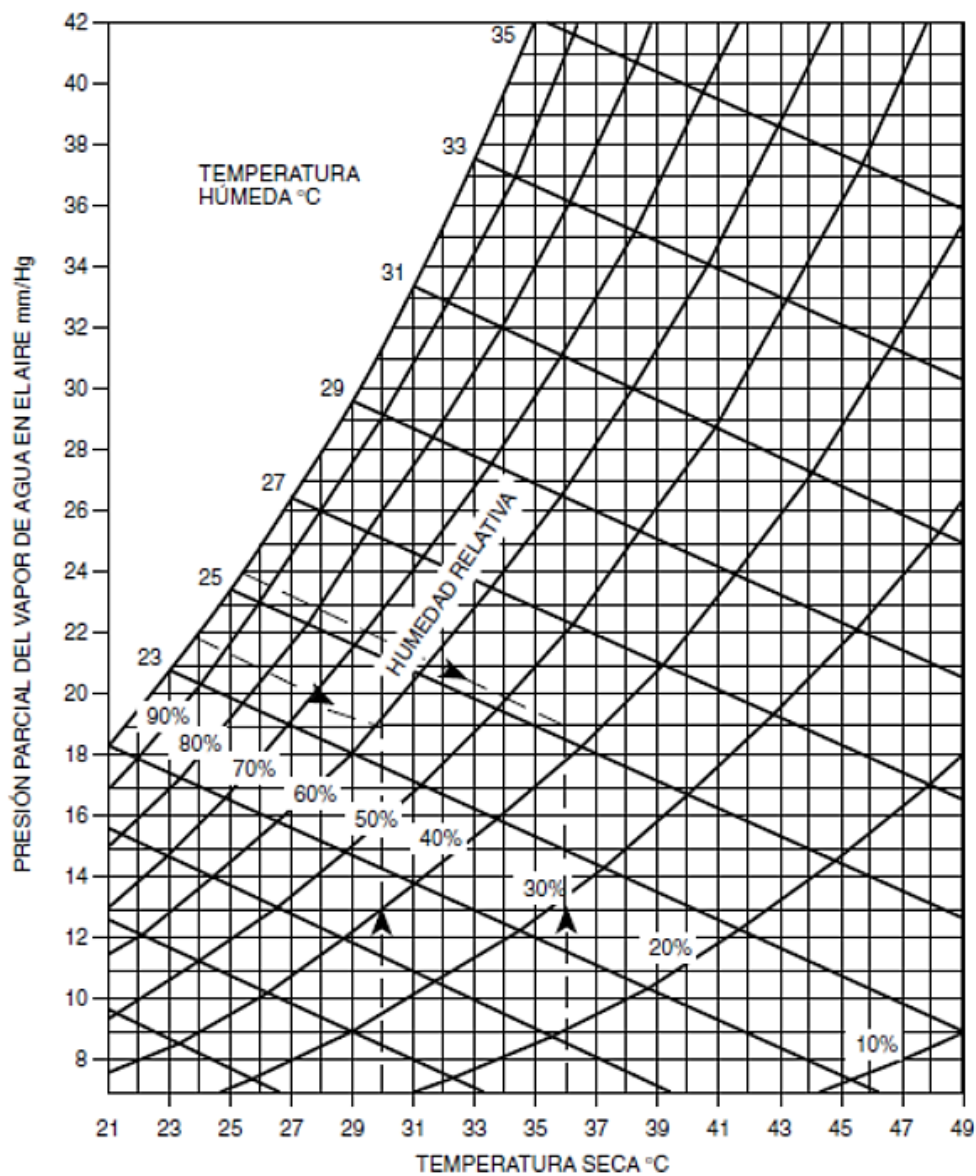


Fig. 4.1. Diagrama Psicrométrico.

4.5. Otras Normas de Interés

La calidad del ambiente interior puede ser expresada en una primera aproximación como el grado en el que se cumplen las exigencias de los individuos, las cuales pueden variar significativamente de unos individuos a otros, por cuanto algunas personas son más sensibles frente a un determinado ambiente y pueden ser más difíciles de complacer que otras, en consecuencia, más fáciles de satisfacer [4.15].

Típicamente, la calidad del ambiente interior se cuantifica estadísticamente en función del porcentaje de personas que encontrarían el ambiente aceptable o inaceptable [4.15].

Dicha metodología de valoración del ambiente interior se basa en el análisis efectuado por P. O. Fanger a partir de la respuesta de más de 1300 individuos a diferentes condiciones ambientales, definidas en función de seis parámetros, cuatro ambientales y dos ligados al individuo: la temperatura del aire, la temperatura radiante media, la humedad relativa, la velocidad del aire, la actividad metabólica y el aislamiento del vestido [4.2, 4.15].

La valoración final se expresa a través de dos índices, definidos en la norma UNE EN ISO 7730:2006: el índice PMV (del inglés Predicted Mean Vote), el cual proporciona una estimación de la sensación térmica y el índice PPD (del inglés Predicted Percentage of Dissatisfied), el cual proporciona información sobre el grado de incomodidad [4.2, 4.15, 4.24].

Estos índices son usados frecuentemente tanto para el diseño de ambientes interiores confortables, así como para la valoración de ambientes ya existentes.

En este sentido, en lo referente a las condiciones en la sala de máquinas de buques, cabe destacar un completo estudio publicado en el año 2010 acerca de las condiciones interiores en la sala de máquinas de un buque mercante que cubría el trayecto entre la Península y las Islas Canarias, en base al índice PMV [4.18].

Esencialmente, el índice PMV refleja el valor medio de los votos emitidos por un grupo numeroso de personas al ser sometidos a diferentes ambientes térmicos dentro de una escala psicofísica de siete niveles, los cuales van desde muy frío (-3) a muy caliente (+3), tal como se indica en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5. Escala de Sensación Térmica.

ESCALA DE SENSACIÓN TÉRMICA	
PMV	Sensación
+3	Muy cálido
+2	Cálido
+1	Ligeramente cálido
0	Confort (neutro)
- 1	Ligeramente frío
- 2	Frío
- 3	Muy frío

El índice PMV se obtiene directamente a partir del calor total acumulado por el individuo, analizado en la ecuación 4.1 [4.24]:

$$PMV = (0,303 \cdot e^{-0,036 \cdot M} + 0,028) \cdot [(M - W) - (K + C + R) - (C_{resp} + E_{resp}) - E_{sud}] \quad (4.14)$$

El índice PPD se obtiene directamente a partir del índice PMV [4.24]:

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{-(0,03353 \cdot PMV^4 + 0,2179 \cdot PMV^2)} \quad (4.15)$$

Como referencia, la norma UNE EN ISO 7730:2006 establece tres clases o categorías de calidad para ambientes interiores basadas en el equilibrio entre las posibilidades económicas y tecnológicas y el menor número de personas insatisfechas usuarias de dichos ambientes, tal como se recoge en la Tabla 4.6 [4.15].

Tabla 4.6. Categorías de Ambiente Térmico.

CATEGORÍAS DE AMBIENTE TÉRMICO		
Categoría	PMV	PPD %
A	-0,2 < PMV < 0,2	< 6
B	-0,5 < PMV < 0,5	< 10
C	-0,7 < PMV < 0,7	< 15

Una vez que en base a los índices anteriores se establece que un ambiente interior no es confortable, conviene valorar el riesgo de estrés térmico, para lo cual es de gran utilidad el índice WBGT (del inglés Wet Bulbe Globe Temperature), cuyo cálculo se describe en detalle en la norma UNE EN 27143:1995 y en la NTP 322 [4.12, 4.29].

Por su sencillez, el índice WBGT constituye una excelente primera referencia para la evaluación de situaciones de estrés térmico, si bien su fiabilidad y utilidad son en cierta medida limitadas [4.16].

Cuando dicho índice WBGT supera los límites establecidos, es necesario realizar un análisis más detallado de la situación, empleando una metodología de mayor precisión que informe en profundidad de las condiciones de estrés térmico, tal como el método del índice IST de sobrecarga térmica descrito en la NTP 350, analizado anteriormente [4.14, 4.16].

Originalmente, el índice WBGT fue desarrollado para un uniforme de trabajo estándar constituido por camisa de manga larga y pantalones, es decir, con un aislamiento térmico intrínseco del atuendo de aproximadamente

$I_{cl} = 0,5 Clo$, si bien es aplicable siempre que la ropa no dificulte de forma importante el intercambio de calor entre la superficie de la piel y el ambiente [4.16].

El índice WBGT se calcula directamente a partir de la temperatura de bulbo húmedo, T_h y la temperatura de globo, T_g [4.12]:

$$WBGT = 0,7 \cdot T_h + 0,3 \cdot T_g \quad (4.16)$$

Cuando la temperatura no es constante en los alrededores del puesto de trabajo, de forma que haya diferencias notables entre mediciones efectuadas a diferentes alturas, debe hallarse el índice WBGT realizando tres mediciones, a nivel de tobillos, abdomen y cabeza, es decir, a una altura de 0,1 m, 1,1 m, y 1,7 m del suelo si la posición en el puesto de trabajo es de pie y a 0,1 m, 0,6 m y 1,1 m, si es sentado, mientras que si el ambiente es homogéneo basta con realizar la medición a la altura del abdomen [4.12].

Como referencia, la norma UNE EN 27143:1995 establece los valores límites admisibles para el índice WBGT en función de la producción de energía metabólica, M , tal como se indica en la Figura 4.2 [4.29].

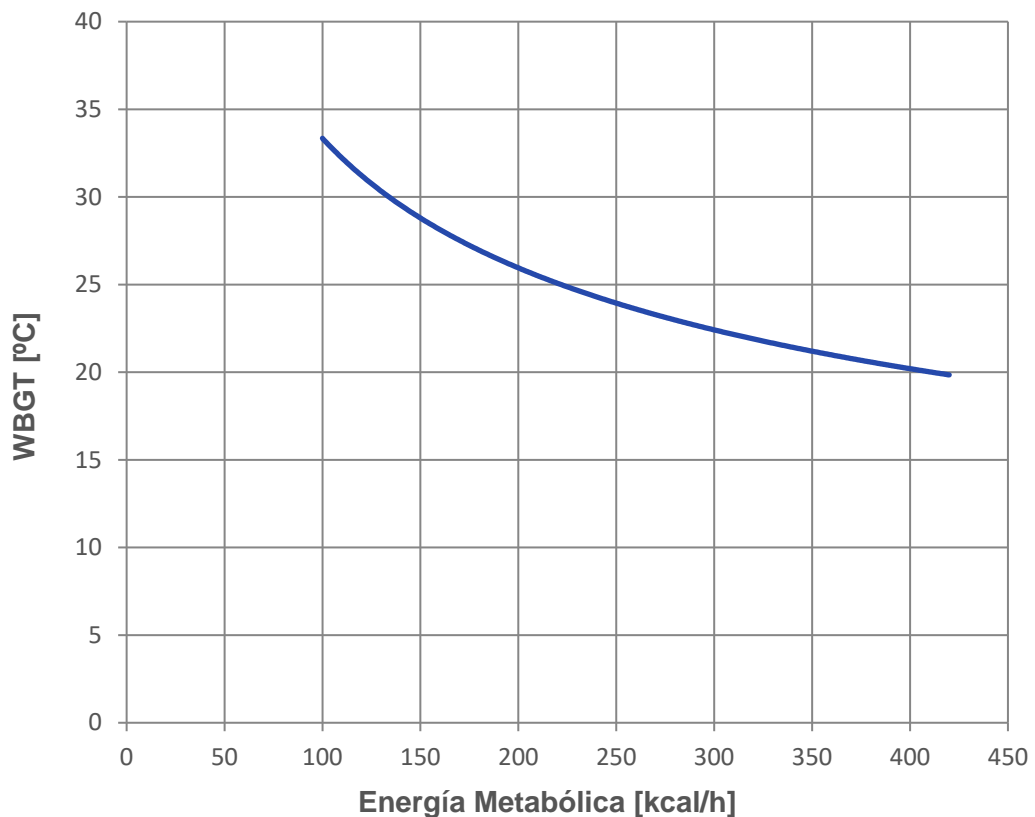


Fig. 4.2. Valores Límite para el Índice WBGT.

4.6. Referencias

- [4.1] H. S. Belding y T. F. Hatch. Index for Evaluating Heat Stress in Terms of Resulting Physiological Strains. Heating, Piping & Air Conditioning, vol. 27, pp. 129-136, 1955.
- [4.2] P. O. Fanger. Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. Ed. McGraw-Hill, 1970.
- [4.3] ILO Accident prevention on board a ship at sea and in port. An ILO code on practice (ISBN 92-2-109450-2). Organización Internacional del Trabajo, Ginebra, 1996.
- [4.4] IMO MSC/circ. 834, Guidelines for the engine-room layout, design and arrangement. Organización Marítima Internacional, 1998.
- [4.5] International Hazard Datasheets on Occupation, Ship-engineer (machinist): http://www.ilo.org/safework/cis/WCMS_193081/lang--en/index.html (Acceso septiembre 2016).
- [4.6] International Maritime Organization Guidance on fatigue: <https://www.gov.uk/government/publications/international-maritime-organization-imo-guidance-on-fatigue.html> (Acceso septiembre 2016).
- [4.7] Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales.
- [4.8] J. S. McKarns y R. S. Brief. Nomographs Gives Refined Estimate of HSI. Heating, Piping & Air Conditioning, vol. 38, pp. 113-116, 1966.
- [4.9] P. R. Mondelo, E. G. Torada, S. Comas, E. Castejón y E. Bartolomé. Ergonomía 2, Confort y estrés térmico. Mutua Universal y Ediciones UPC, 1999. ISBN: 84-8301-316-9.
- [4.10] NTP 18. Estrés térmico. Evaluación de las exposiciones muy intensas: http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/001a100/ntp_018.pdf (Acceso septiembre 2016).
- [4.11] NTP 74. Confort térmico. Método de Fanger para su evaluación: http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/001a100/ntp_074.pdf (Acceso septiembre 2016).
- [4.12] NTP 322. Valoración del riesgo de estrés térmico: índice WBGT: http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/301a400/ntp_322.pdf (Acceso septiembre 2016).

- [4.13] NTP 323. Determinación del metabolismo energético: http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/301a400/ntp_323.pdf (Acceso septiembre 2016).
- [4.14] NTP 350. Evaluación del estrés térmico. Índice de sudoración requerida: http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/301a400/ntp_350.pdf (Acceso septiembre 2016).
- [4.15] NTP 779. Bienestar térmico: criterios para ambientes térmicos confortables: <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/752a783/nTP-779.pdf> (Acceso septiembre 2016).
- [4.16] NTP 922. Estrés térmico y sobrecarga térmica: evaluación de los riesgos (I): <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/NTP/NTP/Ficheros/891a925/922w.pdf> (Acceso septiembre 2016).
- [4.17] NTP 923. Estrés térmico y sobrecarga térmica: evaluación de los riesgos (II): <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/NTP/NTP/Ficheros/891a925/923w.pdf> (Acceso septiembre 2016).
- [4.18] J. A. Orosa y A. C. Oliveira. Assessment of work related risk criteria on board a ship as an aid to designing its onboard environment, Journal of Marine Science and Technology, vol. 15 (1), pp. 16-22, 2010.
- [4.19] J. A. Orosa y J. A. Pérez. Termodinámica Aplicada con EES. Tórculo Ediciones, 2008.
- [4.20] Página web Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, INSHT: <http://www.insht.es/portal/site/Insht/> (Acceso septiembre 2016).
- [4.21] J. A. Pérez, J. A. Orosa y T. Grueiro. A three-dimensional CFD simulation study to reduce heat stress in ships. Applied Thermal Engineering, vol. 94, pp. 413-420, 2016.
- [4.22] Real Decreto 486/1997, de 14 de abril, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo.
- [4.23] UNE EN ISO 7726:2002. Ergonomía de los ambientes térmicos. Instrumentos de medida de las magnitudes físicas.
- [4.24] UNE EN ISO 7730:2006. Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local.

- [4.25] UNE EN ISO 7933:2005. Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del estrés térmico mediante el cálculo de la sobrecarga térmica estimada.
- [4.26] UNE EN ISO 8996:2005. Ergonomía del ambiente térmico. Determinación de la tasa metabólica.
- [4.27] UNE EN ISO 9886:2004. Ergonomía. Evaluación de la sobrecarga térmica mediante mediciones fisiológicas.
- [4.28] UNE EN ISO 9920:2009. Ergonomía del ambiente térmico. Determinación del aislamiento de la vestimenta. Estimación del aislamiento térmico y de la resistencia a la evaporación de un conjunto de ropa.
- [4.29] UNE EN 27243:1995. Ambientes calurosos. Estimación del estrés térmico del hombre en el trabajo basado en el índice WBGT (Temperatura húmeda y temperatura de globo) (ISO 7243:1989).

PARTE III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CAPÍTULO 5: SIMULACIÓN Y ANÁLISIS CFD DE LA SALA DE MÁQUINAS

5.1. Caracterización de la Sala de Máquinas. Modelo Tridimensional

La sala de máquinas analizada presenta una configuración novedosa muy interesante, en línea con las recomendaciones del Plan de Eficiencia Energética en Buques (SEEMP), aunando las ventajas inherentes a la propulsión eléctrica, con las derivadas del empleo de varios motores principales en lugar de un solo motor equivalente con el fin de reducir el consumo de energía y mejorar la eficiencia energética del buque [5.2].

Teniendo en cuenta las características del buque considerado, un buque cablero de última generación, el sistema de propulsión debe garantizar en todo momento la máxima capacidad de maniobra y fiabilidad en el posicionamiento, para lo cual en este caso el constructor ha optado por el empleo de dos motores eléctricos gemelos idénticos conectados convenientemente al eje de la hélice [5.1].

La energía eléctrica necesaria para alimentar tanto los motores como el resto de equipos del buque se obtiene en la sala de máquinas mediante cuatro generadores síncronos con una potencia nominal de 1190 kW cada uno, conectados respectivamente a cuatro motores diésel marinos con una potencia nominal de 1250 kW [5.1].

Como consecuencia, en la sala de máquinas se genera una gran cantidad de calor que debe ser evacuada al exterior por el sistema de ventilación, con el objeto de mantener unas condiciones ambientales mínimamente aceptables [5.8].

En condiciones normales de navegación, todos los ventiladores funcionan de forma continua, eliminando el aire a través de tomas de ventilación situadas en las proximidades de los turbocompresores de los motores e introduciendo aire fresco en los lugares más relevantes, tales como las proximidades de los alternadores, entre otros [5.1, 5.8].

Sin embargo, durante la estancia en puerto sólo se emplea un número reducido de ventiladores como consecuencia de la baja irradiación de calor por parte de los sistemas auxiliares [5.8].

Físicamente, la sala de máquinas se encuentra a popa en la cubierta inferior, justo encima de las sentinas y a proa de la hélice, tal y como se indica en el esquema general del buque presentado en la Figura 3.2, en el que se puede ver la distribución de los principales sistemas e instalaciones [5.1].

Constructivamente, tiene unas dimensiones aproximadas de 10x14x5,5 m y un volumen total de 770 m³, de los cuales aproximadamente un 25% está ocupado por los cuatro motores y demás elementos y equipos complementarios.

Dicho volumen está dividido parcialmente en dos alturas por una cubierta de deambulación situada a una altura de 2,8 m del suelo de la misma, tal y como se puede observar en la Figura 5.1.



Fig. 5.1. Vista General de la Sala de Máquinas.

El taller de máquinas es una pequeña sala complementaria de 13,3 m², completamente equipada para llevar a cabo las tareas cotidianas asociadas a la reparación y mantenimiento de los equipos de la sala de máquinas, que van desde el simple desmontaje y reparación o sustitución de elementos hasta tareas complejas de mecanizado, desde torneado y fresado hasta incluso recargues y otras reparaciones complejas.

Cabe destacar que si bien comparte sistema de ventilación con el resto de la sala de máquinas, su temperatura es ligeramente menor, por cuanto está situada lejos de los motores [5.8].

Contigua a la sala de máquinas se encuentra la sala de control, lugar donde los ingenieros marinos realizan la monitorización de las principales variables de la sala de máquinas por medio de los distintos equipos y ordenadores que aquí se alojan.

La sala de control se encuentra perfectamente acondicionada y climatizada, constituyendo un entorno cómodo que habitualmente es empleado

por el personal como área de recuperación y descanso tras el trabajo en el interior de la sala de máquinas [5.8].

En base a los planos constructivos originales del buque, se ha diseñado un modelo tridimensional completo de la sala de máquinas en el programa de modelado 3D Siemens Solid Edge ST7, en el cual se han incluido los principales elementos y equipos, así como la distribución y dimensiones de las tomas de aire y los demás elementos de interés [5.1, 5.7].

La Figura 5.2 muestra un detalle del modelo 3D de sala de máquinas, en el que con el objeto de facilitar la visualización se ha ocultado la cubierta superior.

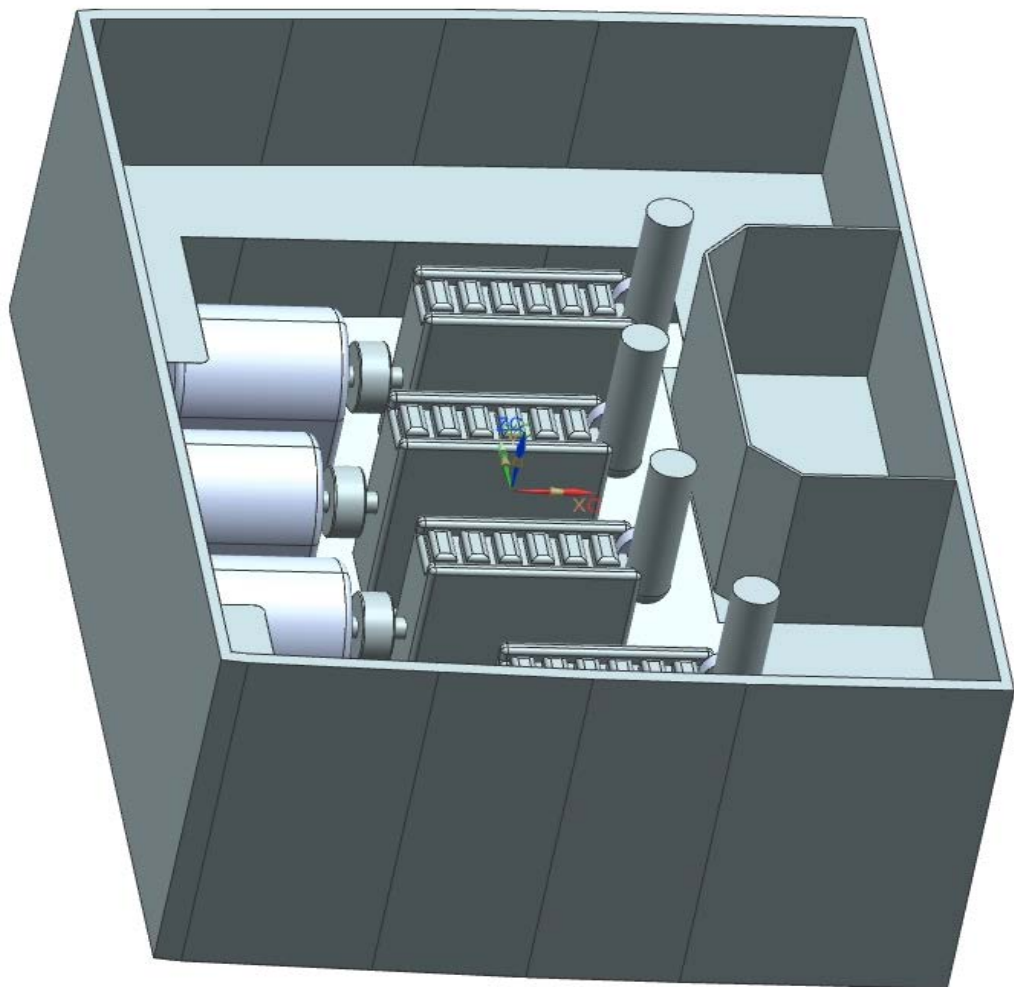


Fig. 5.2. Modelo 3D de la Sala de Máquinas.

5.2. Simulación CFD. Validación Experimental

Una vez modelada la sala de máquinas, su comportamiento térmico ha sido simulado mediante el programa de simulación CFD 3D Mentor Graphics FloEFD, versión 13.2.0, integrado en el entorno Siemens NX [5.3, 5.6].

Dicho entorno de simulación avanzado permite analizar el comportamiento del sistema con todo detalle, considerando incluso aire húmedo, aspecto fundamental en el presente estudio [5.5].

Teniendo en cuenta las características del sistema de ventilación y el flujo de aire inyectado por el mismo, se ha realizado un análisis de flujo turbulento, tomando como parámetros para el control de la convergencia la temperatura del fluido, la temperatura radiante media, la temperatura operativa, la humedad relativa y la velocidad del aire [5.3].

Considerando la geometría del problema, como parte de un test de independencia del mallado, éste se ha refinado en las dos áreas de mayor interés para el presente estudio, cerca de los compresores y en el taller, requiriendo un total de 113081 elementos [5.3, 5.8].

Como condiciones de contorno se han reproducido en detalle las condiciones reales de navegación en el Mar Caribe, con una temperatura exterior media de 29 °C y una humedad relativa del 90%, considerando dos motores principales en servicio, concretamente los motores número 1 y 3, por cuanto constituye el caso más desfavorable [5.8].

En este sentido, cabe destacar que debido al buen aislamiento utilizado en los mamparos, se puede considerar que la transferencia de calor a través de ellos es despreciable [5.8].

Bajo estas consideraciones, han sido necesarias aproximadamente unas 350 iteraciones, con un tiempo de simulación de cinco horas y media en un ordenador personal con un procesador Intel i5 - 4200U, con el objeto de obtener una precisión adecuada en los parámetros de control, concretamente 0,04 °C, en la temperatura del fluido, 0,22% en la humedad relativa, 0,005 m/s en la velocidad media del aire y 0,05 °C en la temperatura operativa.

Para validar las simulaciones CFD de los parámetros termodinámicos del aire interior, se compararon los valores obtenidos con los valores muestreados durante la navegación real, teniendo en cuenta que en condiciones normales el sistema de ventilación renueva el volumen de aire de la sala de máquinas seis veces por hora, es decir, aproximadamente unos 3500 m³/h [5.8].

Bajo estas condiciones, el valor estimado para la temperatura media ha sido de aproximadamente 35 °C, la humedad relativa 69% y la presión 1 bar, valores que se encuentran totalmente en línea con los valores reales medidos durante navegación ordinaria en las condiciones indicadas.

De manera similar, la temperatura en la superficie de los motores principales y en los correspondientes alternadores están en total acuerdo con los valores obtenidos mediante la cámara termográfica, tal como se muestra en las Figuras 5.3 y 5.4.

En particular, la temperatura de la superficie de los principales motores y alternadores estimadas fueron de 77,1 °C y 48,1 °C, respectivamente [5.8].

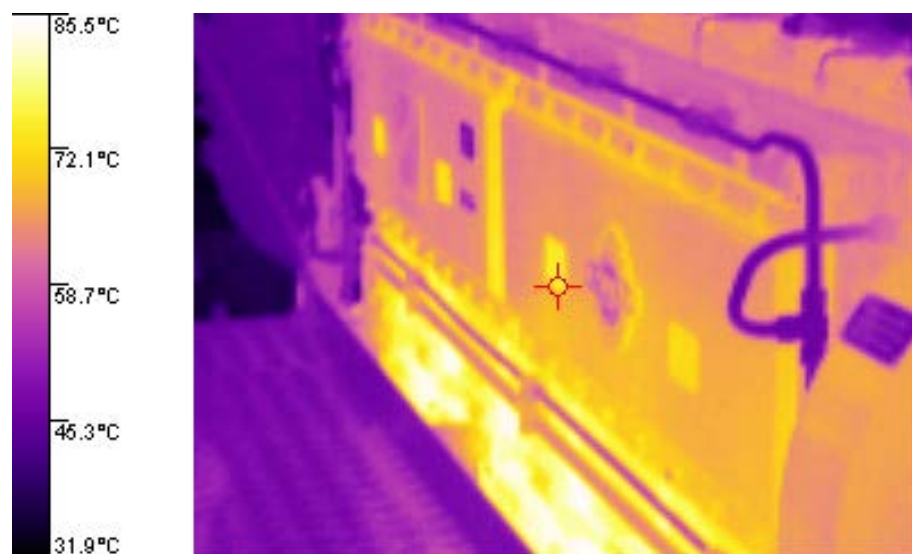


Fig. 5.3. Imagen Térmica de uno de los Motores en Funcionamiento.

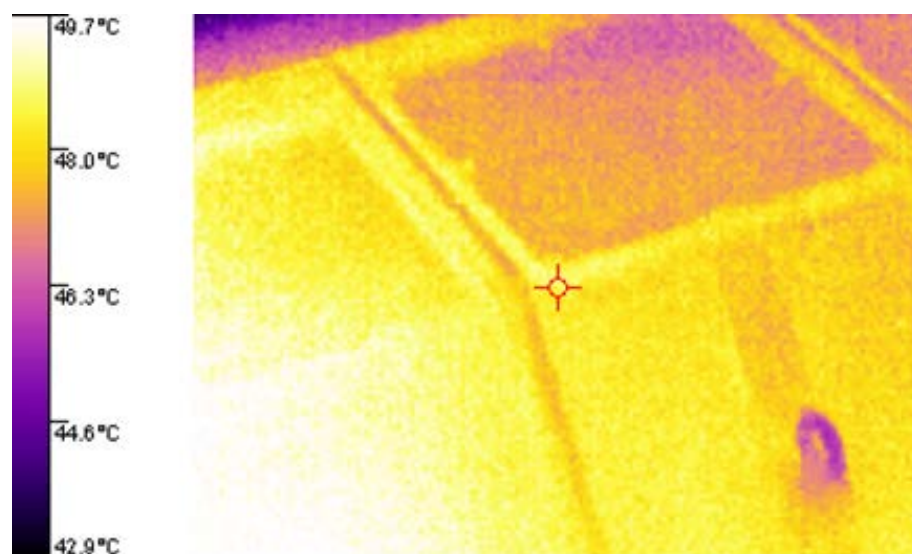


Fig. 5.4. Imagen Térmica de uno de los Alternadores en Servicio.

5.3. Análisis de las Condiciones Ambientales. Puntos Críticos

Con el objeto de tener una perspectiva completa de las condiciones de trabajo y el nivel de estrés térmico de la estancia, una vez validado el modelo, se han analizado entre otros, los siguientes parámetros en toda la sala de máquinas:

- Temperatura.
- Humedad Relativa.
- Temperatura Operativa.
- Velocidad del Fluido.

Cabe destacar que, si bien para el cálculo de algunos de los parámetros involucrados formalmente se requiere la temperatura de globo, la cual no es proporcionada directamente por el entorno de simulación CDF Mentor Graphics FloEFD, ésta puede ser sustituida sin problemas por la temperatura operativa [5.3, 5.4, 5.8].

En este sentido, se estima que la diferencia entre la temperatura operativa y la temperatura de globo es inferior a 0,6 °C, siempre y cuando la velocidad del aire sea inferior a 0,23 m/s y la diferencia entre la temperatura radiante y la temperatura del aire no supere los 15 °C [5.4].

A continuación, en las Figuras 5.5 a 5.8, se presenta para cada una de las variables analizadas las curvas correspondientes a 6 renovaciones de aire por hora (6 ACH) a una altura de 1,5 m sobre la plataforma de deambulación, la cual se corresponde aproximadamente con la altura del centro de masas de un individuo situado sobre la plataforma.

Un análisis en profundidad de dichas curvas pone de manifiesto la elevada falta de uniformidad de los distintos parámetros en la sala de máquinas, como consecuencia esencialmente de la asimetría en la distribución de las tomas de aire a lo largo de la estancia [5.8].

Igualmente, un análisis en profundidad también permite concluir que las condiciones de trabajo más desfavorables en la sala de máquinas se producen en el entorno del turbocompresor nº 3 [5.8].

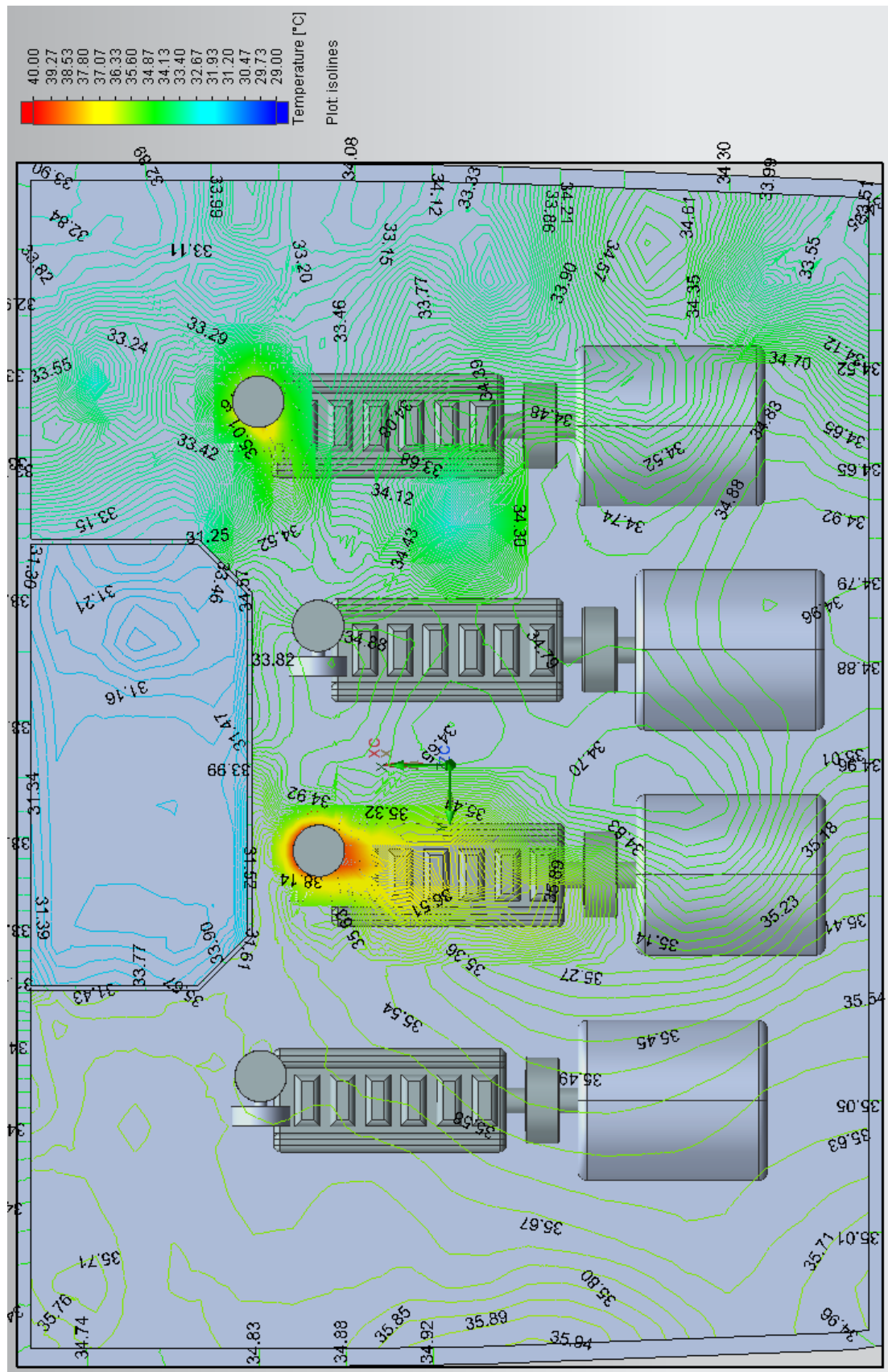


Fig. 5.5. Temperatura Interior en la Sala de Máquinas (6 ACH).

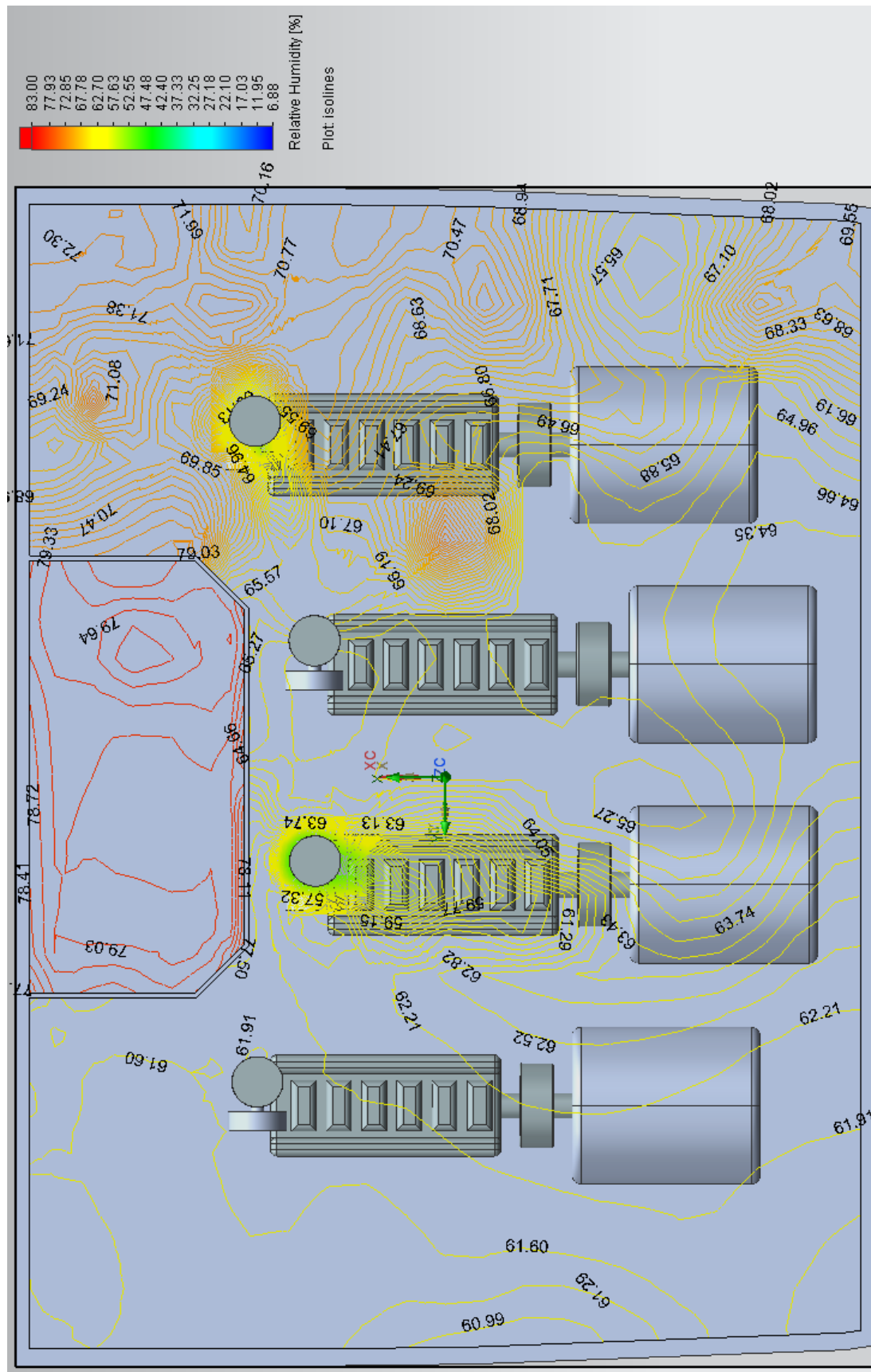


Fig. 5.6. Humedad Relativa en la Sala de Máquinas (6 ACH).

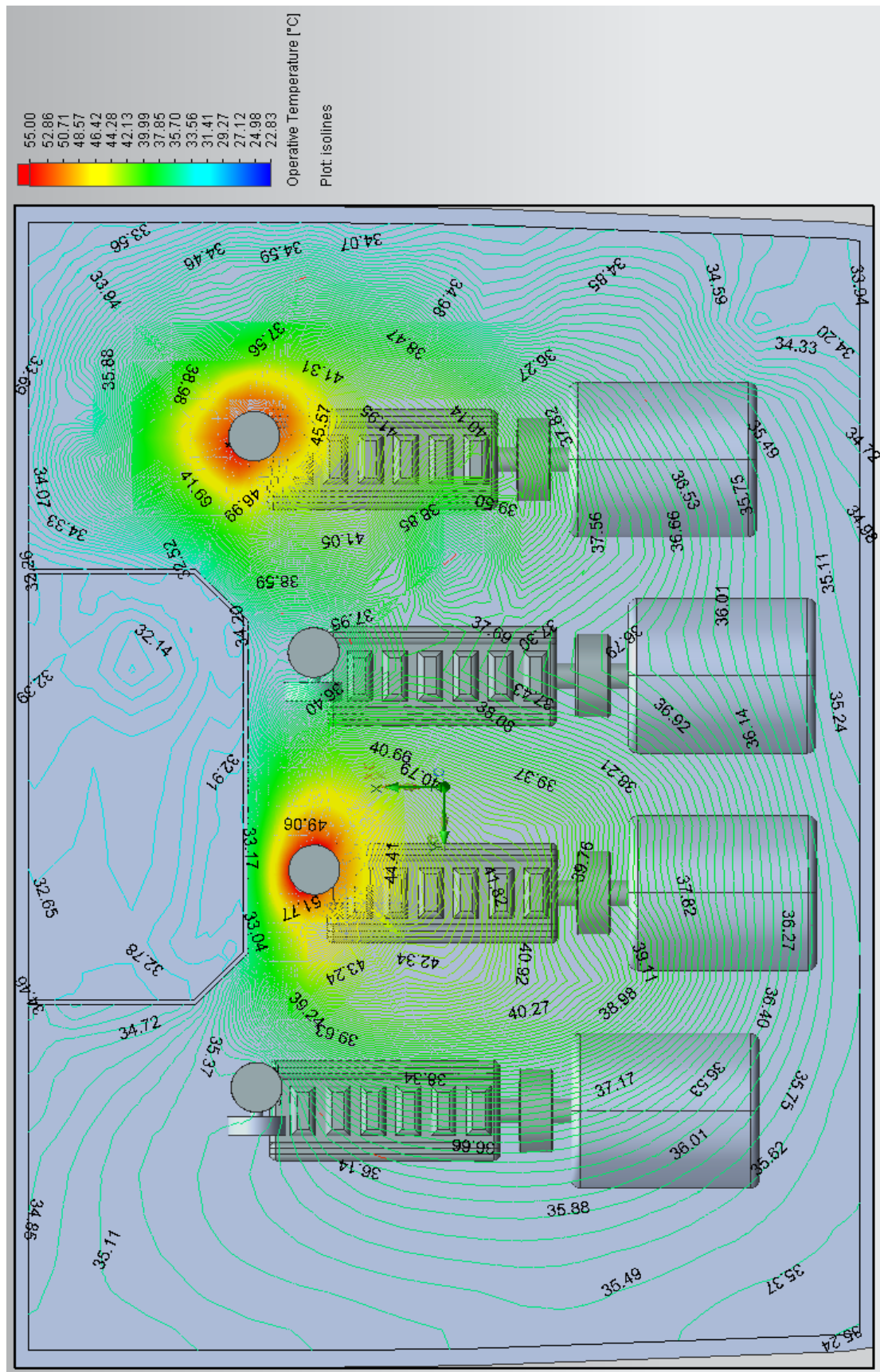


Fig. 5.7. Temperatura Operativa en la Sala de Máquinas (6 ACH).

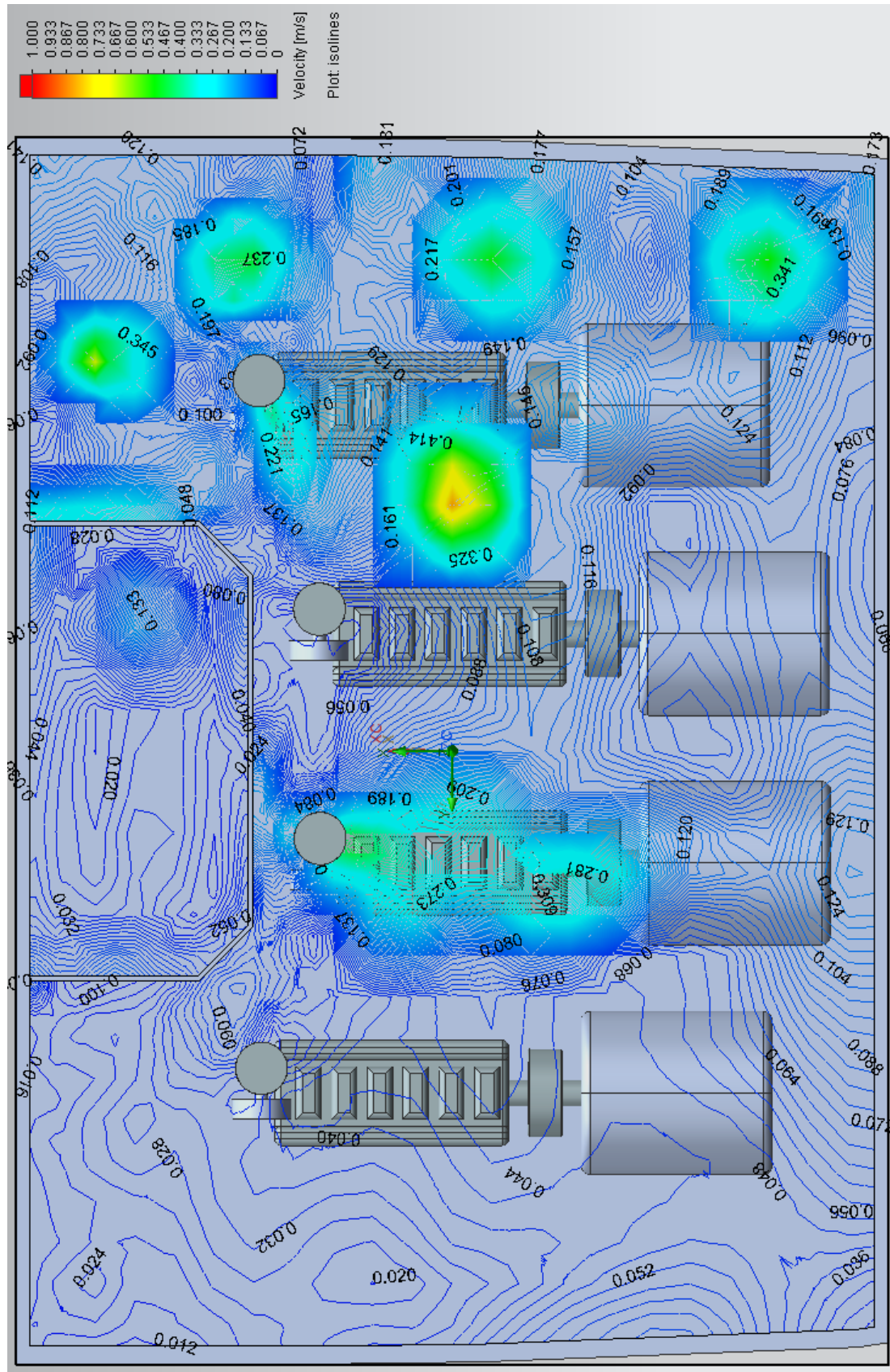


Fig. 5.8. Velocidad del Aire en la Sala de Máquinas (6 ACH).

5.4. Principales Parámetros. Variación con el Régimen de Ventilación

Con el objeto de caracterizar completamente las condiciones de trabajo de los operarios en la sala de máquinas, una vez validado experimentalmente el modelo, se han analizado los principales parámetros en toda la estancia, para lo cual se ha simulado una amplia variedad de casos cubriendo todo el abanico posible de renovaciones de aire: 0,75; 1,5; 3; 6; 9; 12; 15; 18 y 24 ACH.

Tal y como se ha señalado anteriormente, el punto crítico, en el que se producen las condiciones de trabajo más desfavorables, se encuentra en el entorno del turbocompresor nº 3, presentándose en las siguientes figuras la variación en dicho punto de los distintos parámetros considerados en función del número de renovaciones de aire por hora, ACH, en la sala de máquinas.

Como referencia, de un modo complementario, también se representan los valores promedios en la sala de máquinas en las mismas condiciones.

La Figura 5.9 presenta la variación de la temperatura interior con el número de renovaciones de aire por hora en el punto crítico.

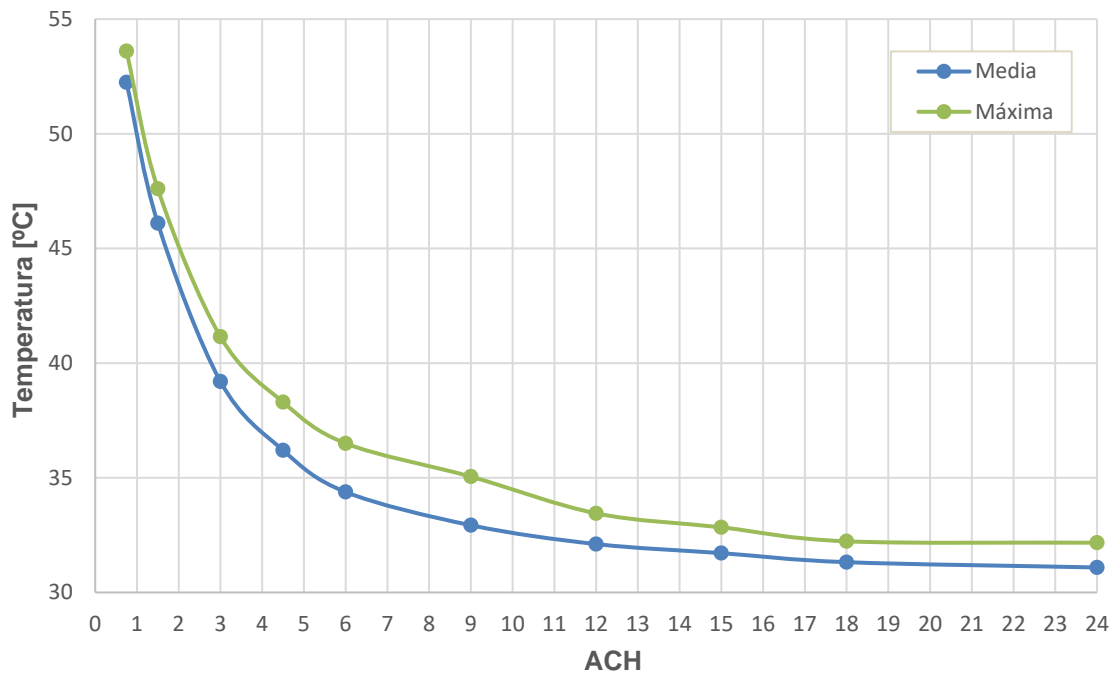


Fig. 5.9. Temperatura Interior vs. Renovaciones de Aire (ACH).

La variación de la humedad relativa en función del número de renovaciones de aire se muestra en la Figura 5.10.

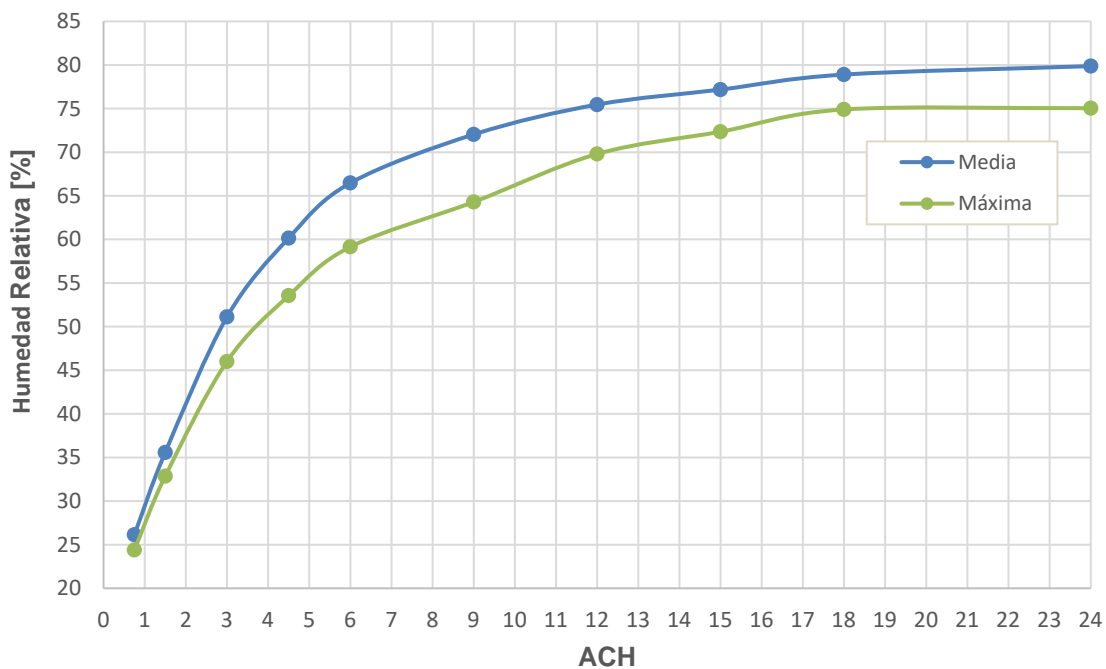


Fig. 5.10. Humedad Relativa vs. Renovaciones de Aire (ACH).

La Figura 5.11 presenta la variación de la temperatura operativa en el punto crítico en función del número de renovaciones por hora (ACH).

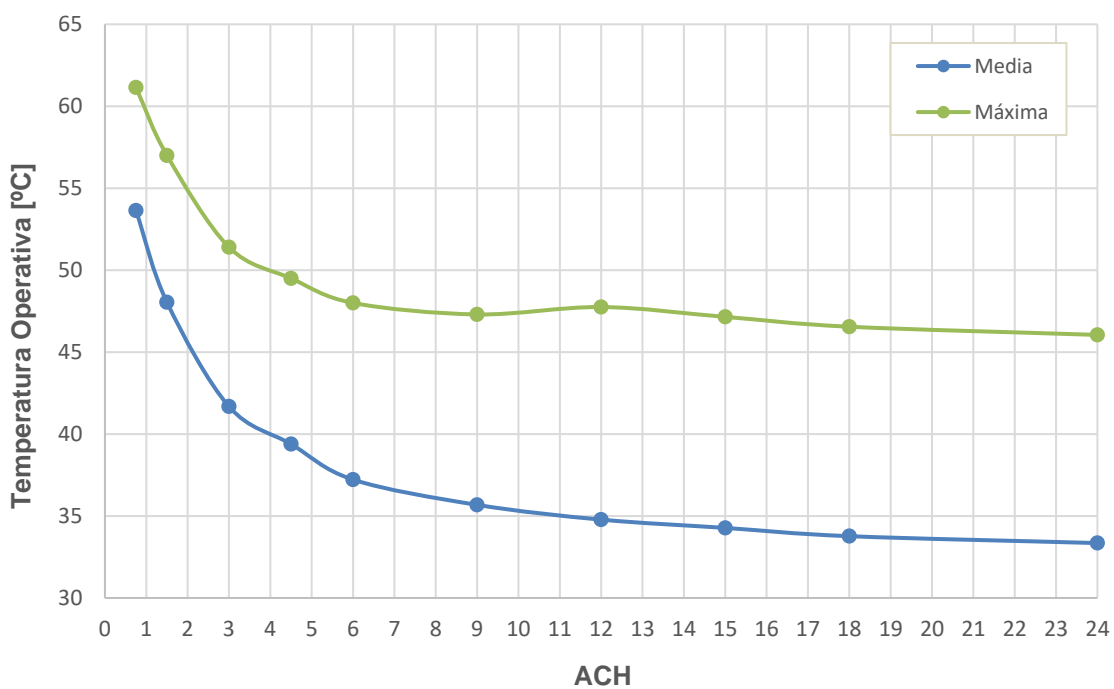


Fig. 5.11. Temperatura Operativa vs. Renovaciones de Aire (ACH).

Finalmente, la Figura 5.12 presenta la variación de la velocidad del aire en el punto crítico en función del número de renovaciones por hora (ACH).

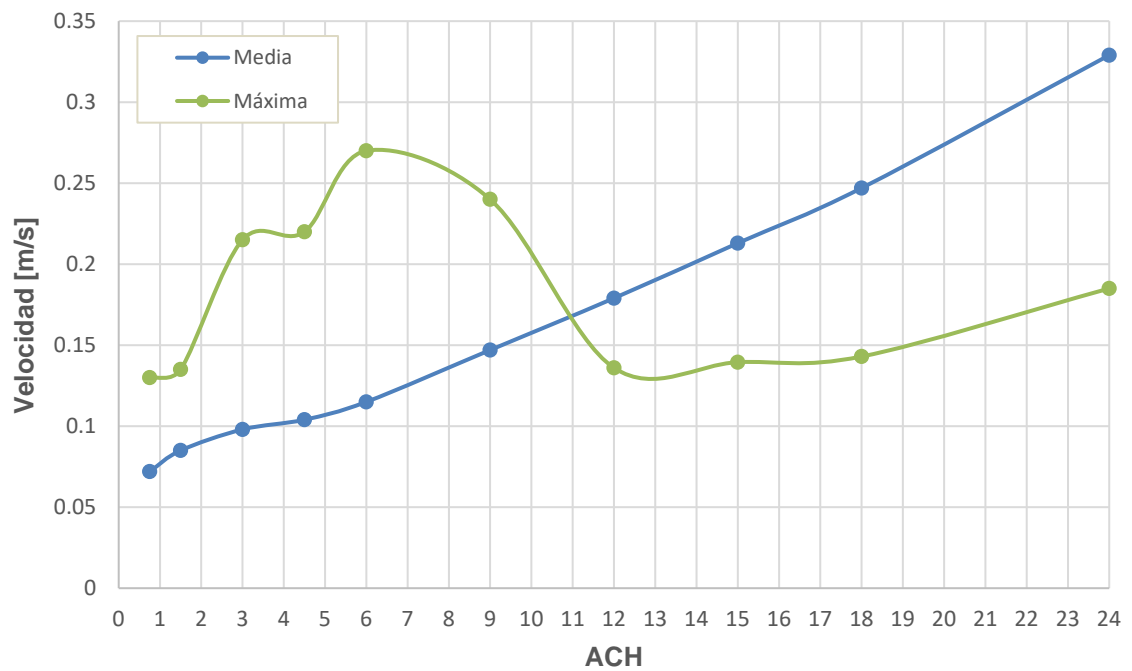


Fig. 5.12. Velocidad del Aire vs. Renovaciones de Aire (ACH).

5.5. Referencias

- [5.1] Base de datos del Astillero Hijos de José Barreras: <http://www.hjbarreras.es/?page=lis-offshore&idp=44> (Acceso septiembre 2016).
- [5.2] Contaminación atmosférica, eficiencia energética y emisiones de gases de efecto invernadero: <http://www.imo.org/es/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Paginas/Default.aspx> (Acceso septiembre 2016).
- [5.3] FloEFD for NX. Technical Reference. Mentor Graphics Corporation, 2015.
- [5.4] M. Kazkaz y M. Pavelek. Operative temperature and globe temperature. Engineering Mechanics, vol. 20(3-4), pp. 319-325, 2013.
- [5.5] Página web Mentor Graphics Floefd for NX: <https://www.mentor.com/products/mechanical/floefd/floefd-nx/> (Acceso septiembre 2016).
- [5.6] Página web Siemens NX: https://www.plm.automation.siemens.com/es_es/products/nx/ (Acceso septiembre 2016).
- [5.7] Página web Siemens Solid Edge ST: https://www.plm.automation.siemens.com/es_es/products/solid-edge/ (Acceso septiembre 2016).
- [5.8] J. A. Pérez, J. A. Orosa y T. Grueiro. A three-dimensional CFD simulation study to reduce heat stress in ships. Applied Thermal Engineering, vol. 94, pp. 413-420, 2016.

CAPÍTULO 6: ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DE TAREAS Y TIEMPOS

6.1. Condiciones de Trabajo en la Sala de Máquinas

La tripulación que trabaja en la sala de máquinas debe realizar frecuentemente múltiples tareas de mantenimiento, inspección y control, tales como por ejemplo la toma de muestras y ajuste de niveles, la revisión de los distintos elementos térmicos y el muestreo de la flexión del eje del motor principal durante la navegación, entre otras [6.5].

En muchas de estas actividades, se estima una tasa metabólica alta e incluso muy alta, aspecto que unido a las altas temperaturas habituales en la cámara de máquinas de un buque, supone un serio riesgo para la salud del personal, convirtiendo la sala de máquinas en un ambiente extremadamente peligroso que es necesario conocer y comprender [6.4, 6.5].

Si bien en los últimos años se han desarrollado diversas normas y recomendaciones al respecto, tanto a nivel nacional como internacional, en la mayoría de los casos constituyen meras aproximaciones teóricas que no convergen con las situaciones reales a bordo, de tal modo que los ingenieros marinos frecuentemente tienen que establecer sus propios tiempos de trabajo y descansos [6.3, 6.5].

Como consecuencia, ante el desconocimiento del riesgo real que supone para su salud, es frecuente que el personal priorice acabar pronto las tareas asignadas, frente a su propia seguridad y salud, despreciando los riesgos derivados de una sobreexposición a condiciones de trabajo extremas [6.5].

En base a estas consideraciones, en el presente capítulo se presenta un completo estudio de las tareas y actividades típicas en la sala de máquinas de un buque moderno, estableciendo los tiempos máximos de trabajo admisibles, así como los correspondientes tiempos de descanso, de acuerdo con las recomendaciones de las distintas normas analizadas anteriormente.

Concretamente, en el presente estudio se ha considerado la NTP 350 para el cálculo de los máximos tiempos de trabajo admisibles y la NTP 18 para el cálculo de los tiempos de descanso preceptivos [6.1, 6.2].

6.2. Máximo Tiempo de Trabajo Admisible

Para definir el máximo tiempo que el personal puede permanecer de forma segura en la sala de máquinas de acuerdo con los criterios establecidos en la NTP 350, en el presente estudio se han definido tres posibles regímenes de trabajo en la sala de máquinas [6.2]:

- Trabajo ligero, con una carga metabólica $M=90 \text{ W/m}^2$.
- Trabajo moderado, con una carga metabólica $M=120 \text{ W/m}^2$.
- Trabajo intenso, con una carga metabólica $M=155 \text{ W/m}^2$.

Teniendo en cuenta las particularidades del personal embarcado, con frecuentes vacaciones y permisos, se ha calculado el tiempo máximo admisible tanto para operario no aclimatado, como para operario aclimatado.

Si bien la aclimatación se logra en períodos breves de tiempo, típicamente entre 5 y 10 días, sin embargo, sus efectos se pierden fácilmente después de un período de ausencia del trabajo relativamente corto, en torno a 2 semanas [6.2].

La Figura 6.1 presenta los resultados obtenidos para los distintos regímenes de trabajo analizados.

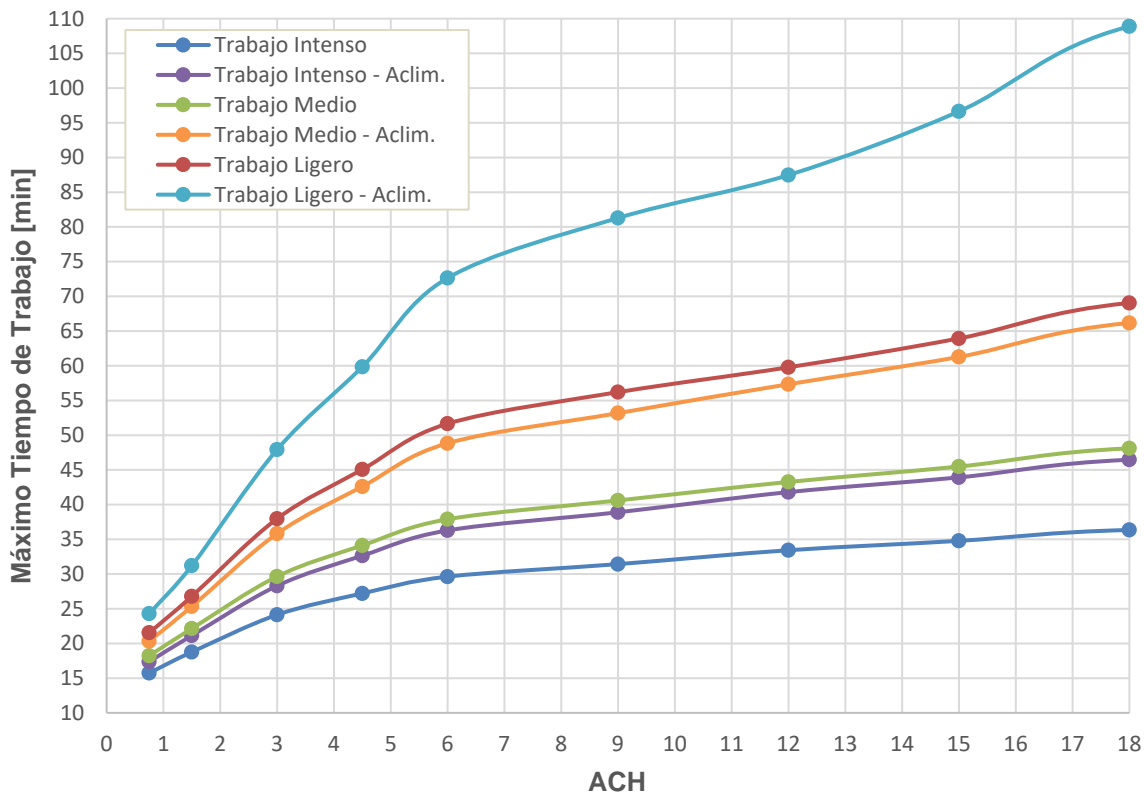


Fig. 6.1. Tiempo Máximo de Trabajo en la Sala de Máquinas.

6.3. Tiempos de Descanso y Recuperación

Para la recuperación del individuo tras el trabajo en la sala de máquinas, se prevé que repose en la sala de control, un entorno de descanso en condiciones controladas, con una temperatura seca de $24 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y una humedad

relativa del 75%, lo cual requeriría un tiempo máximo de descanso de aproximadamente 24 minutos, según la norma NTP 18 [6.1].

En lo que respecta a los tiempos necesarios para la recuperación, cabe destacar que a medida que disminuye la temperatura de la sala de control, existe una ligera reducción del tiempo necesario de recuperación.

Por ejemplo, si se bajase la temperatura a 20 °C, valor típicamente considerado en las zonas de descanso, el tiempo bajaría a 22,45 minutos, mientras que bajar la temperatura a 18 °C, reduciría el tiempo a 21,8 minutos.

Sin embargo, esa pequeña reducción en el tiempo de descanso necesario no compensa el grado de incomodidad que presentaría el personal como consecuencia del excesivo contraste de temperaturas, tanto con respecto al aire exterior, que en el caso analizado se encuentra a 29 °C, como fundamentalmente con respecto a la sala de máquinas.

En este sentido, un contraste excesivo no solo produce incomodidad, sino que también puede derivar en problemas de salud, como por ejemplo, el aumento de la frecuencia de enfermedades por enfriamiento excesivo, básicamente gripes y resfriados.

Como consecuencia, en base al análisis anterior, se considera que las condiciones óptimas para la sala de control son una temperatura entre 23 ÷ 25 °C y una humedad relativa del 75% ÷ 80%, situación que se corresponde en gran medida con la real del buque analizado.

6.4. Distribución Diaria de Tareas. Análisis y Optimización

En base a la programación diaria de las tareas a desarrollar por el personal en la sala de máquinas facilitada por el propio personal y los tiempos máximos admisibles presentados en la Figura 6.1, se establece el régimen de ventilación óptimo.

En concreto, para el caso analizado, se concluye que para garantizar la seguridad de los operarios sería necesario un mínimo de 15 renovaciones por hora.

Cabe señalar que incluso con un número tan alto de renovaciones un operario no aclimatado estaría en una situación límite, superando en algunas tareas el tiempo máximo admisible, tal y como se pone de manifiesto en las Tablas 6.1 y 6.2, en las que se presenta la programación diaria de tareas para un día típico dividida en las dos guardias que debe realizar cada operario.

Tabla 6.1. Programación Diaria de Tareas. Primera Guardia.

PRIMERA GUARDIA							
Hora	Tarea	Nivel de Actividad	Tiempo Requerido	Tiempo Admisible No aclim.	Tiempo Descanso No aclim.	Tiempo Admisible Aclimatado	Tiempo Descanso Aclimatado
08:00	Organización del Trabajo	Ligero	15	64,4	5,59	98,2	3,67
09:00	Revisión de niveles	Medio	45	45,7	23,7	61,8	17,5
10:00	Revisión de elementos térmicos	Intenso	45	34,9 Peligro	31,3	44,15	24,5
11:00	Purgado y ajuste de niveles	Ligero	15	64,4	5,59	98,2	3,67
11:15	Toma de Muestras	Medio	45	45,7	23,7	61,8	17,5

Tabla 6.2. Programación Diaria de Tareas. Segunda Guardia.

SEGUNDA GUARDIA							
Hora	Tarea	Nivel de Actividad	Tiempo Requerido	Tiempo Admisible No aclim.	Tiempo Descanso No aclim.	Tiempo Admisible Aclimatado	Tiempo Descanso Aclimatado
20:00	Organización del Trabajo	Ligero	15	64,4	5,59	98,2	3,67
20:30	Tareas vigilancia e inspección	Medio	30	45,7	15,75	61,8	11,7
22:00	Tareas vigilancia e inspección	Medio	15	45,7	7,9	61,8	5,85
23:00	Tareas vigilancia e inspección	Medio	15	45,7	7,9	61,8	5,85
24:00	Tareas vigilancia e inspección	Medio	15	45,7	7,9	61,8	5,85

Cabe destacar que tampoco aporta nada aumentar el número de renovaciones a 18 por hora, por cuanto apenas se ganaría un par de minutos, incrementándose el tiempo admisible a 36,34 minutos.

De todos modos, aunque no es deseable, se puede permitir dicha situación, por cuanto se produce de forma puntual mientras el operario no se aclimata, en cuyo caso se recomienda que dicha tarea sea dividida en dos con un descanso intermedio, tal como se indica en la Tabla 6.3.

Tabla 6.3. Personal no Aclimatado. Nueva División de Tareas.

DIVISIÓN DE TAREAS PERSONAL NO ACLIMATADO				
Tarea	Nivel de Actividad	Tiempo Requerido	Tiempo Admisible No aclim.	Tiempo Descanso No aclim.
Revisión de elementos térmicos	Intenso	25	34,9	17,9
		20		13,75

Sin embargo, un análisis en profundidad de las tablas anteriores pone de manifiesto que la programación de tareas actual no es adecuada, por cuanto no se respetan convenientemente los tiempos de descanso y recuperación de acuerdo con la NTP 18, siendo necesario reformular completamente la distribución de tareas [6.1].

Las Tablas 6.4 y 6.5 presentan la versión revisada de la programación diaria de tareas, respetando los tiempos de descanso pertinentes.

Tabla 6.4. Programación Diaria de Tareas Revisada. Primera Guardia.

PRIMERA GUARDIA							
Hora	Tarea	Nivel de Actividad	Tiempo Requerido	Tiempo Admisible No aclim.	Tiempo Descanso No aclim.	Tiempo Admisible Aclimatado	Tiempo Descanso Aclimatado
08:00	Organización del Trabajo	Ligero	15	64,4	5,59	98,2	3,67
09:00	Revisión de niveles	Medio	45	45,7	23,7	61,8	17,5
10:30	Revisión de elementos térmicos	Intenso	45	34,9 Peligro	31,3	44,15	24,5
12:00	Purgado y ajuste de niveles	Ligero	15	64,4	5,59	98,2	3,67
12:30	Toma de Muestras	Medio	45	45,7	23,7	61,8	17,5

Tabla 6.5. Programación Diaria de Tareas Revisada. Segunda Guardia.

SEGUNDA GUARDIA							
Hora	Tarea	Nivel de Actividad	Tiempo Requerido	Tiempo Admisible No aclim.	Tiempo Descanso No aclim.	Tiempo Admisible Aclimatado	Tiempo Descanso Aclimatado
20:00	Organización del Trabajo	Ligero	15 min	64,4	5,59	98,2	3,67
20:45	Tareas vigilancia e inspección	Medio	30	45,7	15,75	61,8	11,7
22:00	Tareas vigilancia e inspección	Medio	15	45,7	7,9	61,8	5,85
23:00	Tareas vigilancia e inspección	Medio	15	45,7	7,9	61,8	5,85
24:00	Tareas vigilancia e inspección	Medio	15	45,7	7,9	61,8	5,85

De modo complementario, la Figura 6.2 presenta de forma gráfica la distribución de tareas revisada, indicando tanto los tiempos de actividad como los correspondientes periodos de descanso a lo largo de una jornada típica.

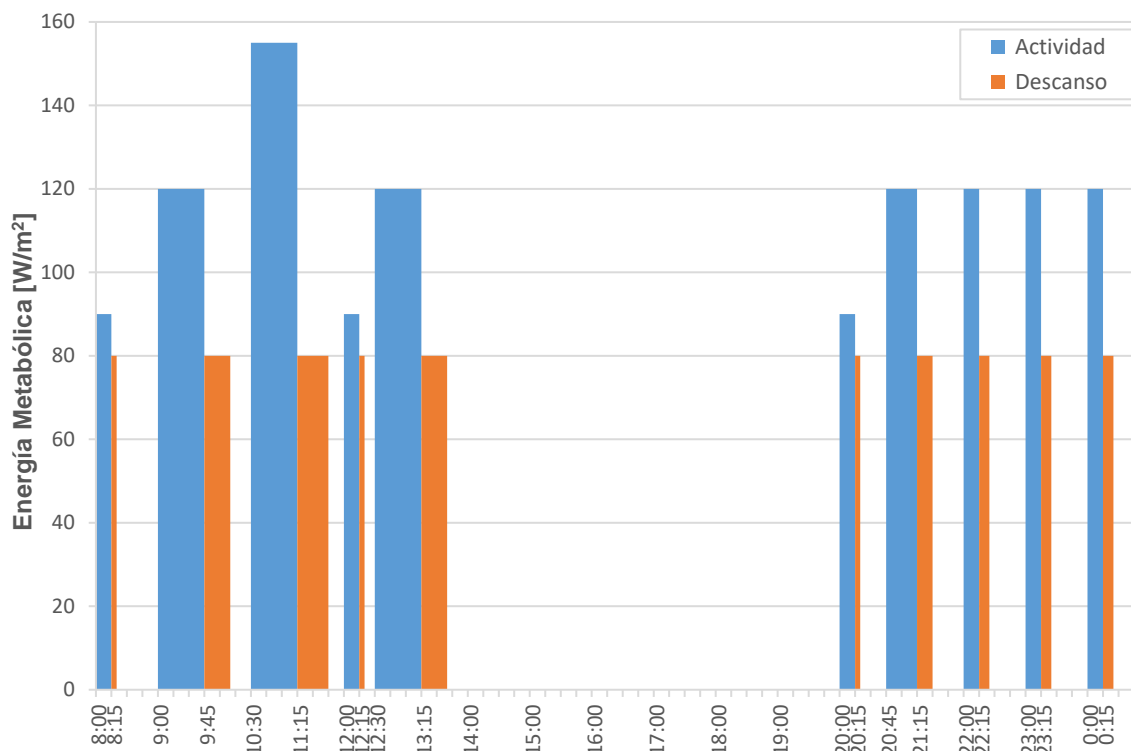


Fig. 6.2. Programación Diaria de Tareas Revisada.

6.5. Otras Tareas de Interés

Además del estudio anterior en base a la planificación diaria de tareas, resulta de gran interés la realización de un estudio individualizado de las principales tareas a desarrollar en la sala de máquinas.

Dicho estudio, entre otros aspectos, tiene como objeto definir las bases para el futuro desarrollo de una guía de trabajo en la sala de máquinas con gráficas y tablas de fácil manejo por el propio personal de la sala de máquinas, el cual ante el desconocimiento del riesgo real que supone para su salud, frecuentemente asume riesgos innecesarios en el trabajo, priorizando acabar pronto las tareas asignadas, frente a su propia seguridad y salud [6.4, 6.5].

En este sentido, entre las tareas típicas que se realizan en la sala de máquinas de un buque moderno cabe señalar las siguientes [6.5]:

Tabla 6.6. Principales Tareas a Desarrollar en la Sala de Máquinas.

TAREAS EN LA SALA DE MÁQUINAS				
Tarea	Tasa Metabólica (Met)	Energía Metabólica (W/m²)	Aislamiento Térmico (Clo)	Tiempo Unitario Necesario (min)
Inspección visual	1,0	58,0	1,0	6
Monitorización de niveles	1,2	69,6	1,0	2
Limpieza de filtros	2,0	116,0	1,0	30
Muestreo flexión del eje	3,0	174,0	1,0	30
Retirar inyectores	4,0	232,0	1,0	30

En base a estos valores, se ha calculado el tiempo máximo que un operario aclimatado podría estar realizando dichas tareas de acuerdo con los criterios de la NTP 350, el cual se representa en función de la temperatura de globo en el ambiente en la Figura 6.3 [6.2].

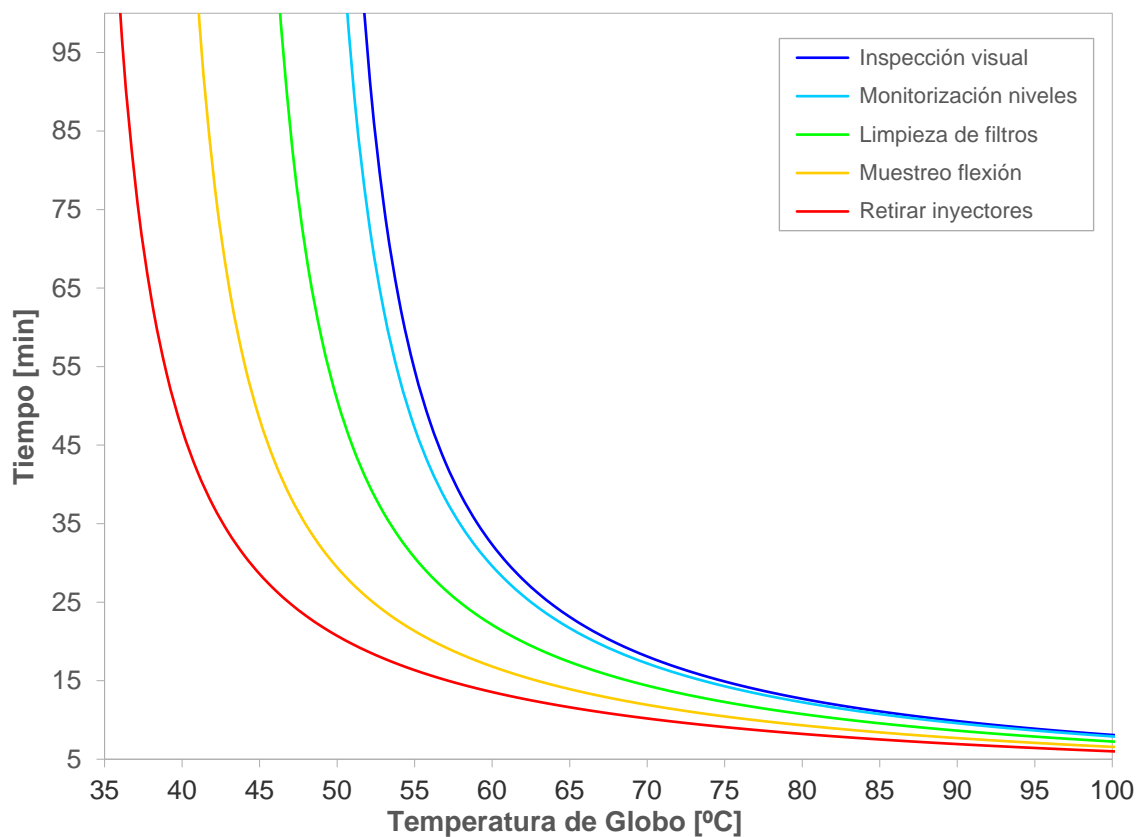


Fig. 6.3. Tiempo Máximo en la Sala de Máquinas.

De un modo complementario, entre las tareas que el personal ha de realizar en el taller cabe destacar las siguientes [6.5]:

Tabla 6.7. Principales Tareas a Desarrollar en el Taller de Máquinas.

TAREAS EN EL TALLER DE MÁQUINAS				
Tarea	Tasa Metabólica (Met)	Energía Metabólica (W/m²)	Aislamiento Térmico (Clo)	Tiempo Necesario (min)
Calibrado de inyectores	1,0	58,0	1,0	15
Taladrado	1,8	104,4	1,0	5
Torneado	2,0	116,0	1,0	60
Soldadura	2,3	133,4	1,0	30
Corte de chapas	3,5	203,0	1,0	20

En base a estos valores, se ha calculado el tiempo máximo que un operario aclimatado podría estar realizando dichas tareas de acuerdo con los criterios de la NTP 350, el cual se representa en función de la temperatura de globo en el ambiente en la Figura 6.4 [6.2].

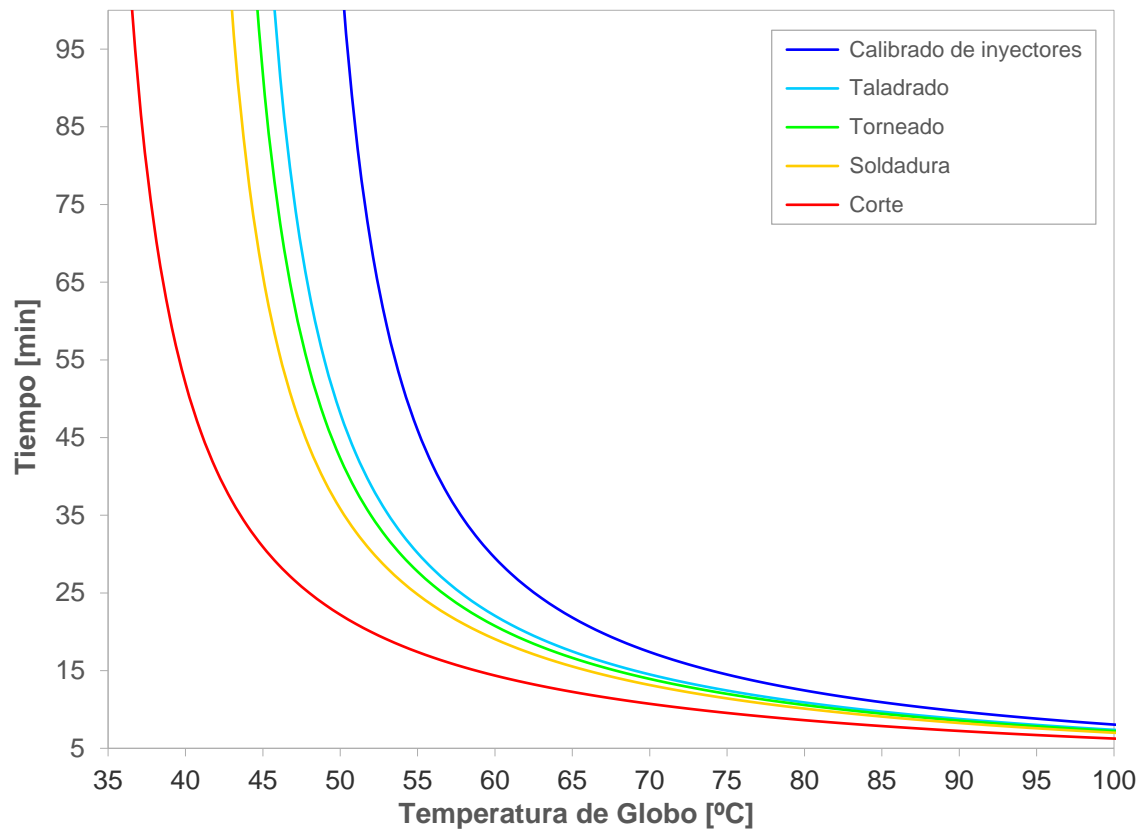


Fig. 6.4. Tiempo Máximo en el Taller de Máquinas.

Tal y como se ha indicado anteriormente, tras una exposición prolongada a condiciones extremas de temperatura el individuo debe recuperarse en un entorno apropiado con condiciones controladas durante un tiempo mínimo, el cual puede ser estimado directamente en base a la norma NTP 18 [6.1].

La Figura 6.5 presenta en función de la temperatura de globo en el local de descanso el tiempo mínimo necesario para la completa recuperación tras una exposición prolongada a condiciones extremas, calculado de acuerdo con la NTP 18 [6.1].

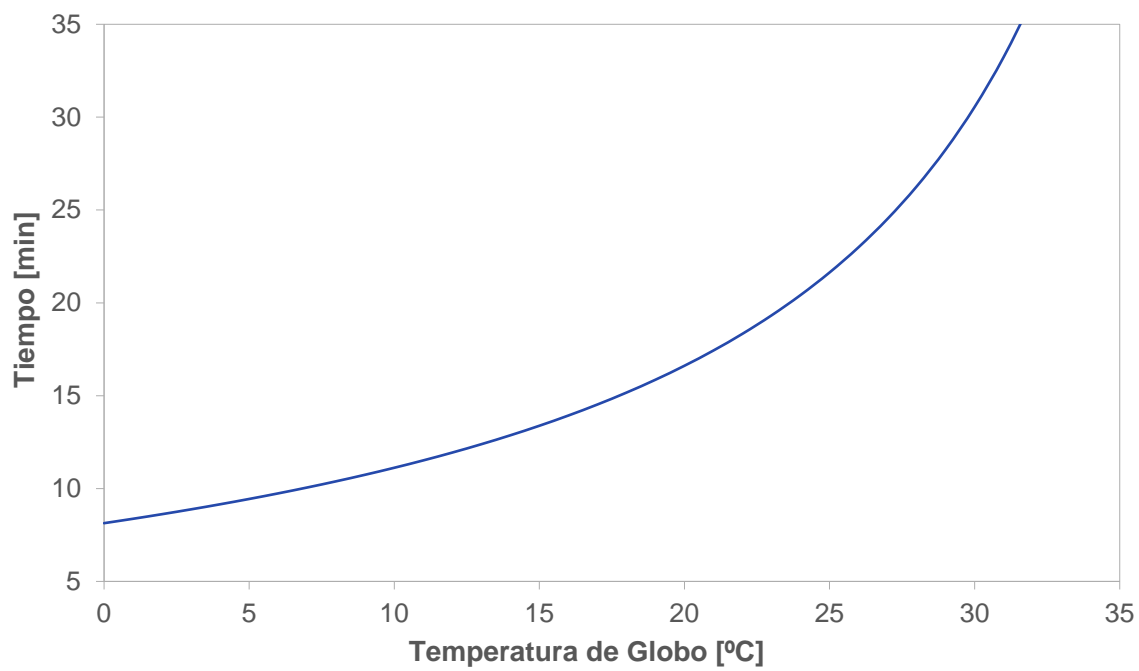


Fig. 6.5. Tiempo Mínimo de Recuperación.

6.6. Referencias

- [6.1] NTP 18. Estrés térmico. Evaluación de las exposiciones muy intensas: http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/001a100/ntp_018.pdf (Acceso septiembre 2016).
- [6.2] NTP 350. Evaluación del estrés térmico. Índice de sudoración requerida: http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/301a400/ntp_350.pdf (Acceso septiembre 2016).
- [6.3] NTP 922. Estrés térmico y sobrecarga térmica: evaluación de los riesgos (I): <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/NTP/NTP/Ficheros/891a925/922w.pdf> (Acceso septiembre 2016).
- [6.4] J. A. Orosa, R. Santos y J. A. Pérez. A practical case study of the relationship between work risk prevention and fatigue at work in spanish merchant ships. Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries, vol. 21(5), pp. 484-492, 2011.
- [6.5] J. A. Pérez, J. A. Orosa y T. Grueiro. A three-dimensional CFD simulation study to reduce heat stress in ships. Applied Thermal Engineering, vol. 94, pp. 413-420, 2016.

CAPÍTULO 7: OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN

7.1. Criterios de Diseño y Optimización

Esencialmente, el sistema de ventilación introduce aire fresco del exterior, de tal modo que constituye el principal y más eficaz medio de control tanto de la temperatura, como de la concentración de contaminantes en la atmósfera de la sala de máquinas [7.6, 7.7].

Como consecuencia, desde los inicios de la propulsión mecánica en buques, se estableció la necesidad de introducir un caudal mínimo de renovación del aire de la sala de máquinas, si bien los criterios y necesidades establecidas para su dimensionamiento han cambiado radicalmente con el paso del tiempo [7.3].

Así, en un principio se consideraba que la renovación de aire simplemente debía garantizar que no se superase un determinado nivel de concentración de CO₂, criterio similar al que se empleaba en las antiguas minas de carbón [7.3].

Ya durante la II Guerra Mundial se puso de manifiesto la necesidad de tener en cuenta además las condiciones de trabajo del personal embarcado, sobre todo en buques que servían en zonas tropicales [7.3].

Sin embargo, hoy en día, como consecuencia de la modernización de las instalaciones y la introducción de nuevos equipos electrónicos, todas estas consideraciones no son suficientes, siendo necesario además garantizar el control de la temperatura ambiente con el objeto de asegurar el correcto funcionamiento de los equipos y evitar averías innecesarias [7.7].

Como consecuencia, el adecuado dimensionamiento del sistema de ventilación constituye uno de los puntos clave en donde resulta de gran interés aplicar una estrategia completa de mejora de la eficiencia energética en un buque moderno, por cuanto representa aproximadamente entre el 3,5% y el 5,5% de la potencia nominal instalada [7.2, 7.7].

En este sentido, en base a un análisis en profundidad de la planificación diaria de tareas presentada anteriormente, como medida primaria de optimización y ahorro energético se propone reducir el número de renovaciones a un valor mínimo cuando la sala de máquinas se encuentra vacía, es decir la mayor parte del día.

Puntualmente, cuando estén programadas tareas en la sala de máquinas, se propone incrementar el número de renovaciones de aire al valor recomendado previamente, 15 ACH.

De acuerdo con las características de los equipos instalados, en el caso del buque analizado se considera que para estabilizar la temperatura en las condiciones correspondientes a 15 ACH, un tiempo razonable sería el necesario para que todo el volumen de aire se renueve al menos 1,5 veces antes de cada tarea programada, es decir, aproximadamente unos 6 minutos.

En consecuencia, en una jornada típica, los ventiladores funcionarían a tope un total de 255 minutos para que los operarios puedan completar las tareas previstas, más 60 minutos para la estabilización y convergencia, lo que supone en total 315 minutos, es decir 5,25 horas, aproximadamente un 21,8% del día.

Como referencia para establecer el valor mínimo del número de renovaciones se considera que como mínimo, un operario no aclimatado debería poder estar en la sala de máquinas al menos 15 minutos, con el objeto de poder realizar con toda seguridad cualquier comprobación rutinaria no programada y disponer del tiempo necesario para conectar el sistema de ventilación a velocidad alta si se estima necesario incrementar el tiempo de permanencia como consecuencia de alguna emergencia.

Además, también es necesario garantizar el correcto funcionamiento de los equipos instalados en la sala de máquinas, para lo cual, de acuerdo con las recomendaciones de los manuales de procedimientos de los principales fabricantes de equipos marinos, la temperatura de la sala de máquinas no debe superar los 49 °C [7.5].

Como resultado, se establece como valor nominal 1,5 renovaciones por hora, lo cual da una temperatura máxima de 47,7 °C y un tiempo máximo de estancia para operario no aclimatado en tareas pesadas de 18,76 minutos, incrementándose a 21,13 minutos para un operario aclimatado.

7.2. Ahorro Energético

En base a las consideraciones anteriores, se puede calcular directamente el consumo energético de la instalación y el ahorro energético obtenido con la solución propuesta.

De acuerdo con el balance energético del buque, se estima que para 15 renovaciones por hora es necesario que todos los ventiladores y extractores funcionen prácticamente a plena carga, con una potencia instalada de 100 kW, es decir 135 CV, lo que supone aproximadamente un 4,5% de la potencia nominal del buque [7.1].

Regulando la ventilación de acuerdo con el esquema anterior, el consumo de energía se reduciría a unos 712,5 kW·h al día, aproximadamente un 30% del consumo nominal, suponiendo un ahorro considerable, sin que, sin embargo, se produzca ningún menoscabo en la productividad o en la seguridad del personal de la sala de máquinas.

A modo de resumen, los consumos estimados, así como los ahorros previstos con el esquema de regulación propuesto se detallan en la Tabla 7.1.

Tabla 7.1. Optimización del Consumo de Energía.

CONSUMO DE ENERGÍA						
Régimen	Renovaciones ACH	Tiempo	Potencia nominal	Consumo de Energía	Consumo Total	Potencia Equivalente
Sin regulación	15x	24 h	100 kW	2400 kW·h	2400 kW·h	100 kW (4,5%)
Con Regulación	1,5x	18,75 h	10 kW	187,5 kW·h	712,5 kW·h	29,78 kW (1,32%)
	15x	5,25 h	100 kW	525 kW·h		

Cabe destacar que el ahorro previsto es menor del que cabría esperar en una primera aproximación, teniendo en cuenta que en teoría el caudal es proporcional a la velocidad y la potencia consumida es proporcional a la velocidad al cubo, de tal modo que el consumo debería reducirse en la misma proporción, si bien dicho razonamiento solo es válido para pequeñas variaciones de caudal [7.4].

Para grandes variaciones de caudal es más adecuado emplear las curvas de rendimiento de los equipos de regulación proporcionadas por los fabricantes de equipos industriales de regulación y control, de las que se deduce que para un 10% del flujo, la potencia consumida es aproximadamente el 10% de la potencia nominal [7.4].

La Figura 7.1 presenta la estimación de la reducción real de potencia consumida en función de la reducción de caudal [7.4]:

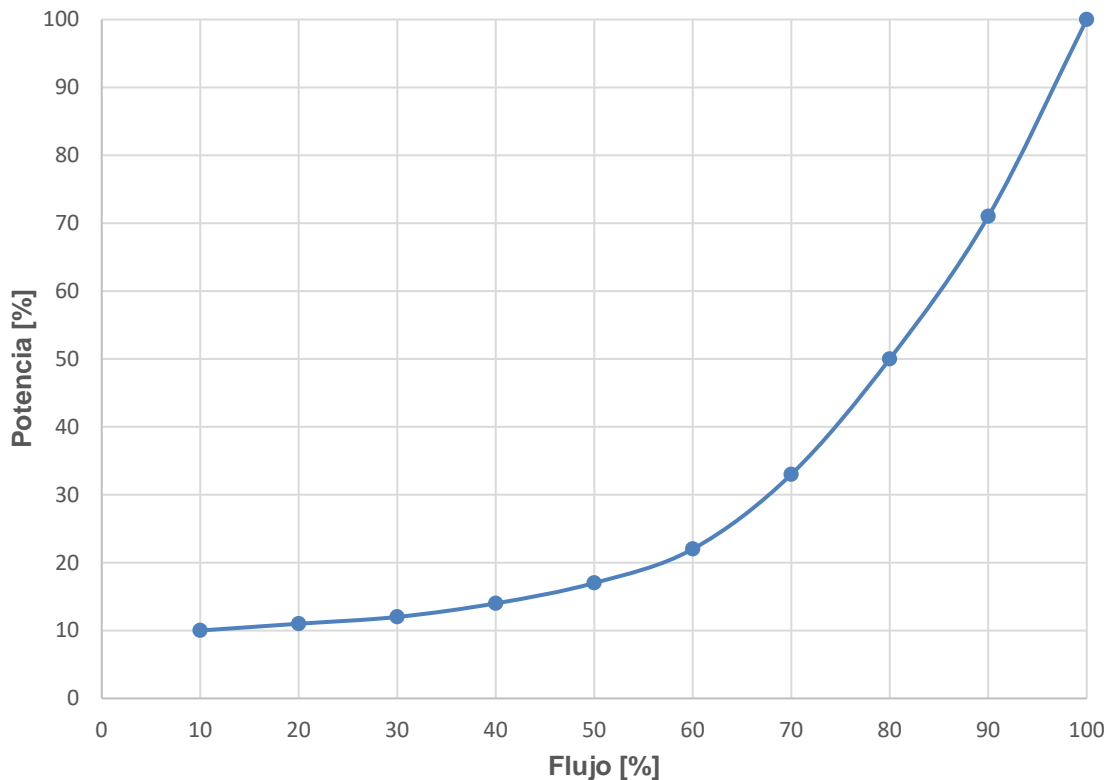


Fig. 7.1. Rendimiento de los Equipos de Regulación.

7.3. Condiciones Ambientales en la Sala de Máquinas

Una vez establecido el régimen óptimo para el sistema de ventilación y estimados los ahorros energéticos obtenidos, resulta interesante analizar las condiciones ambientales en la sala de máquinas en las dos situaciones establecidas por el algoritmo de control propuesto, 15 ACH y 1,5 ACH.

Con el objeto de proporcionar una perspectiva completa de las condiciones de trabajo y el nivel de estrés térmico de la estancia, al igual que en los casos anteriores, se presentan a continuación las curvas correspondientes para los principales parámetros analizados para a altura de 1,5 m con respecto a la plataforma.

Las Figuras 7.2 y 7.3 presentan las curvas correspondientes a la temperatura, para 15 ACH y 1,5 ACH, respectivamente.

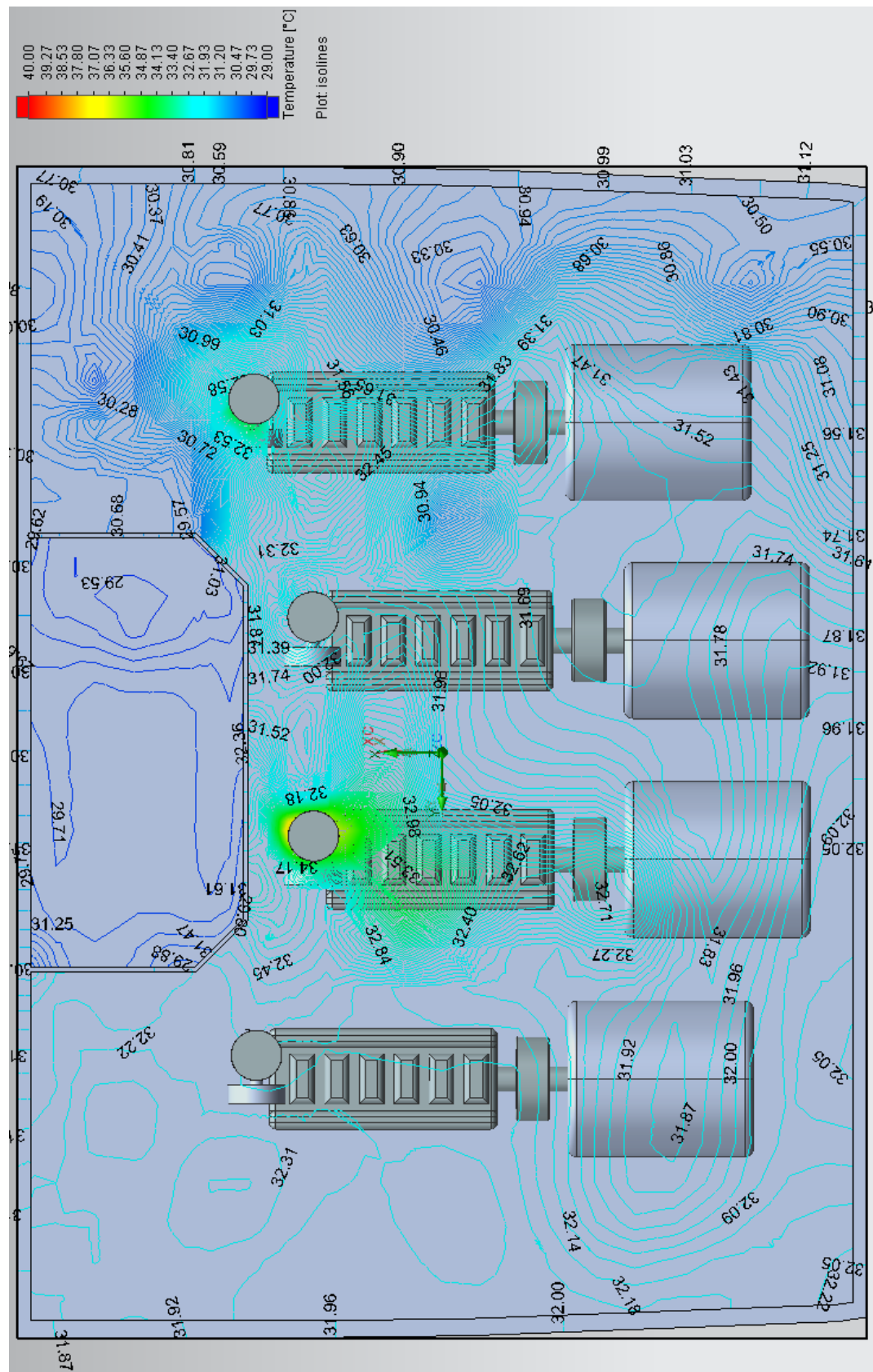


Fig. 7.2. Temperatura Interior en la Sala de Máquinas (15 ACH).

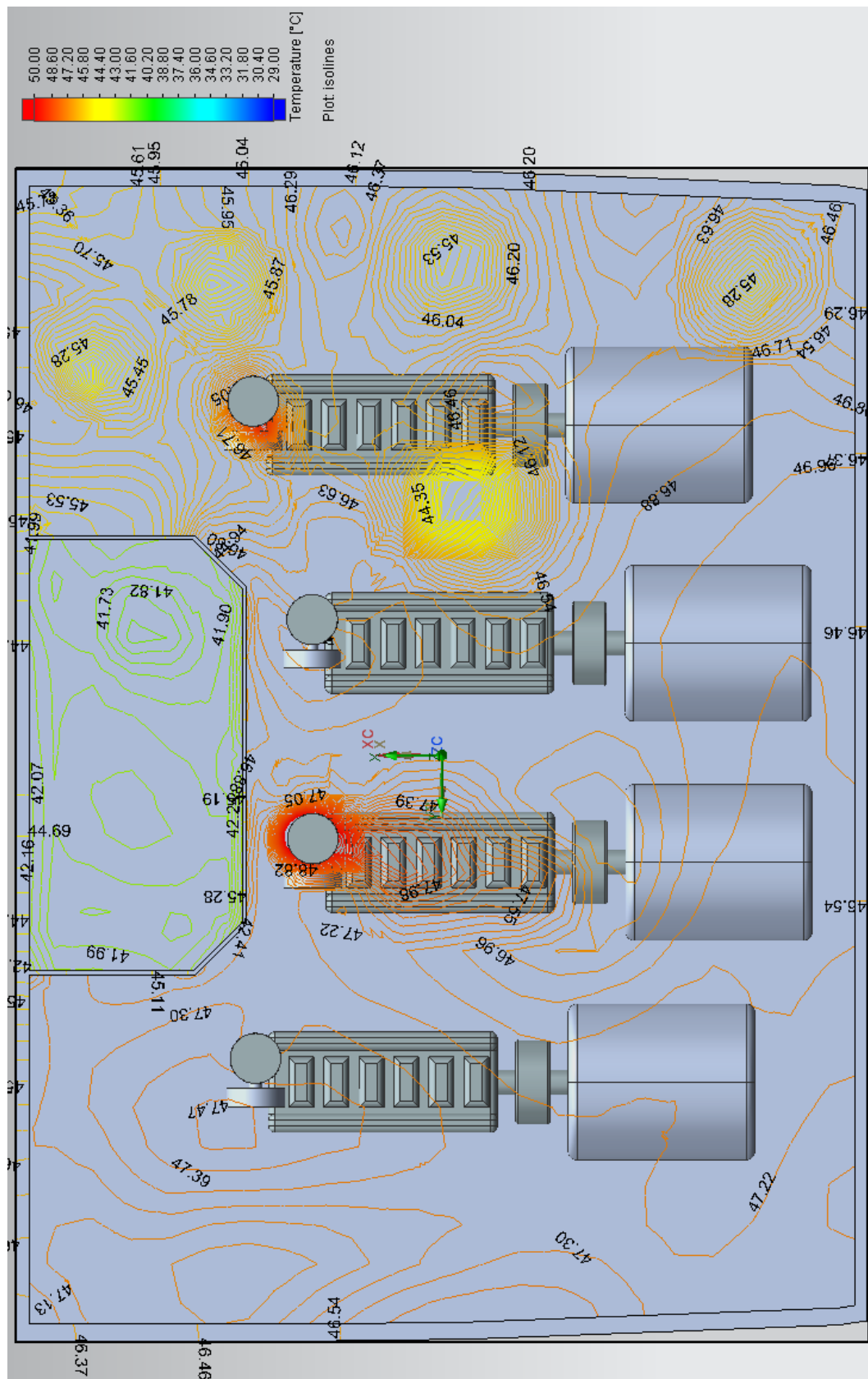


Fig. 7.3. Temperatura Interior en la Sala de Máquinas (1,5 ACH).

Las Figuras 7.4 y 7.5 presentan las curvas correspondientes a la humedad relativa, para 15 ACH y 1,5 ACH, respectivamente.

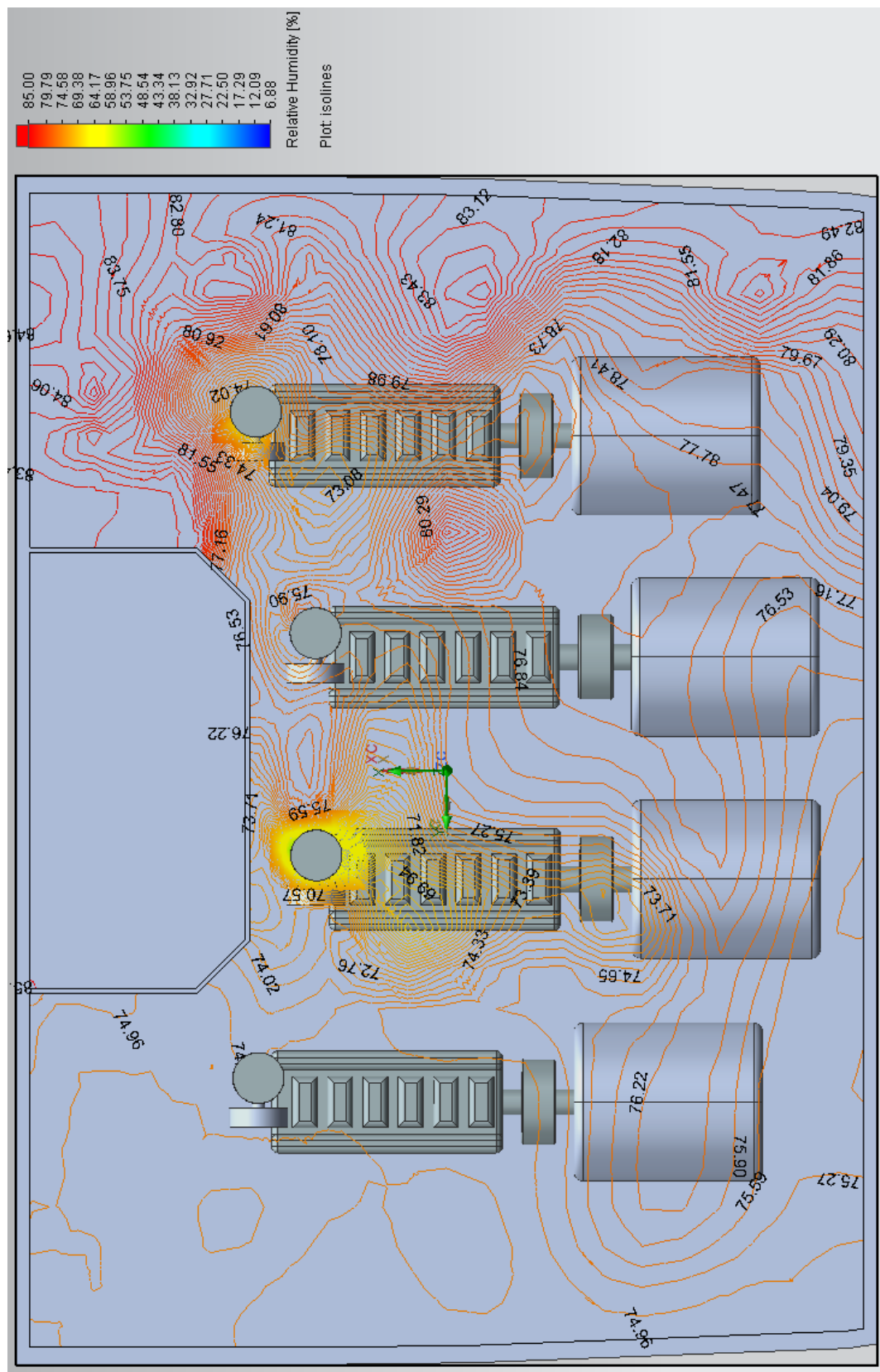
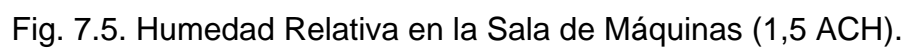


Fig. 7.4. Humedad Relativa en la Sala de Máquinas (15 ACH).



Las Figuras 7.6 y 7.7 presentan las curvas correspondientes a la temperatura operativa, para 15 ACH y 1,5 ACH, respectivamente.

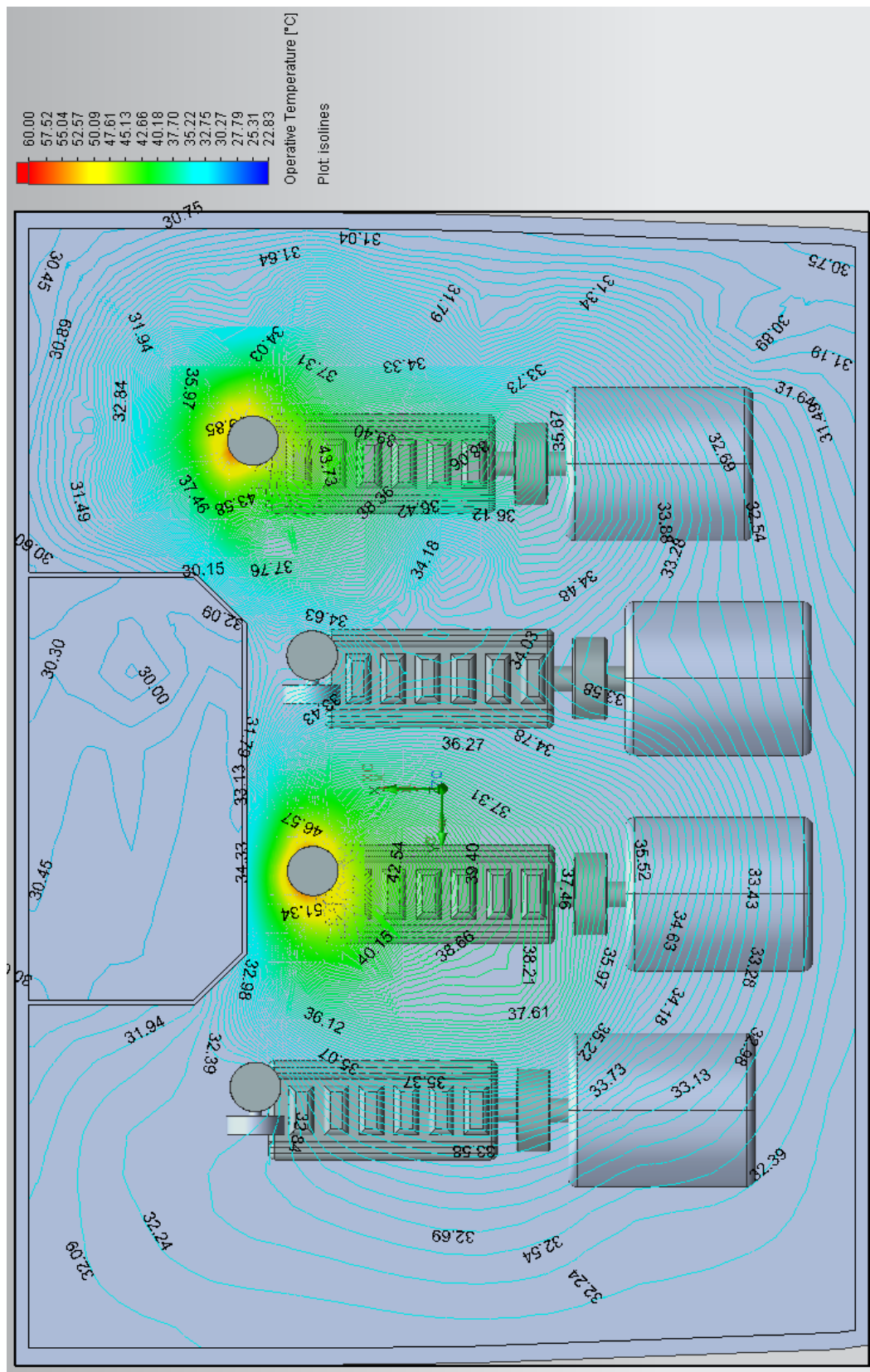
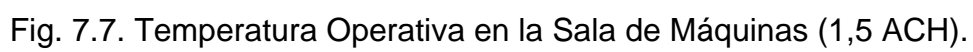


Fig. 7.6. Temperatura Operativa en la Sala de Máquinas (15 ACH).



Finalmente, las Figuras 7.8 y 7.9 presentan las curvas correspondientes a la velocidad del aire, para 15 ACH y 1,5 ACH, respectivamente.

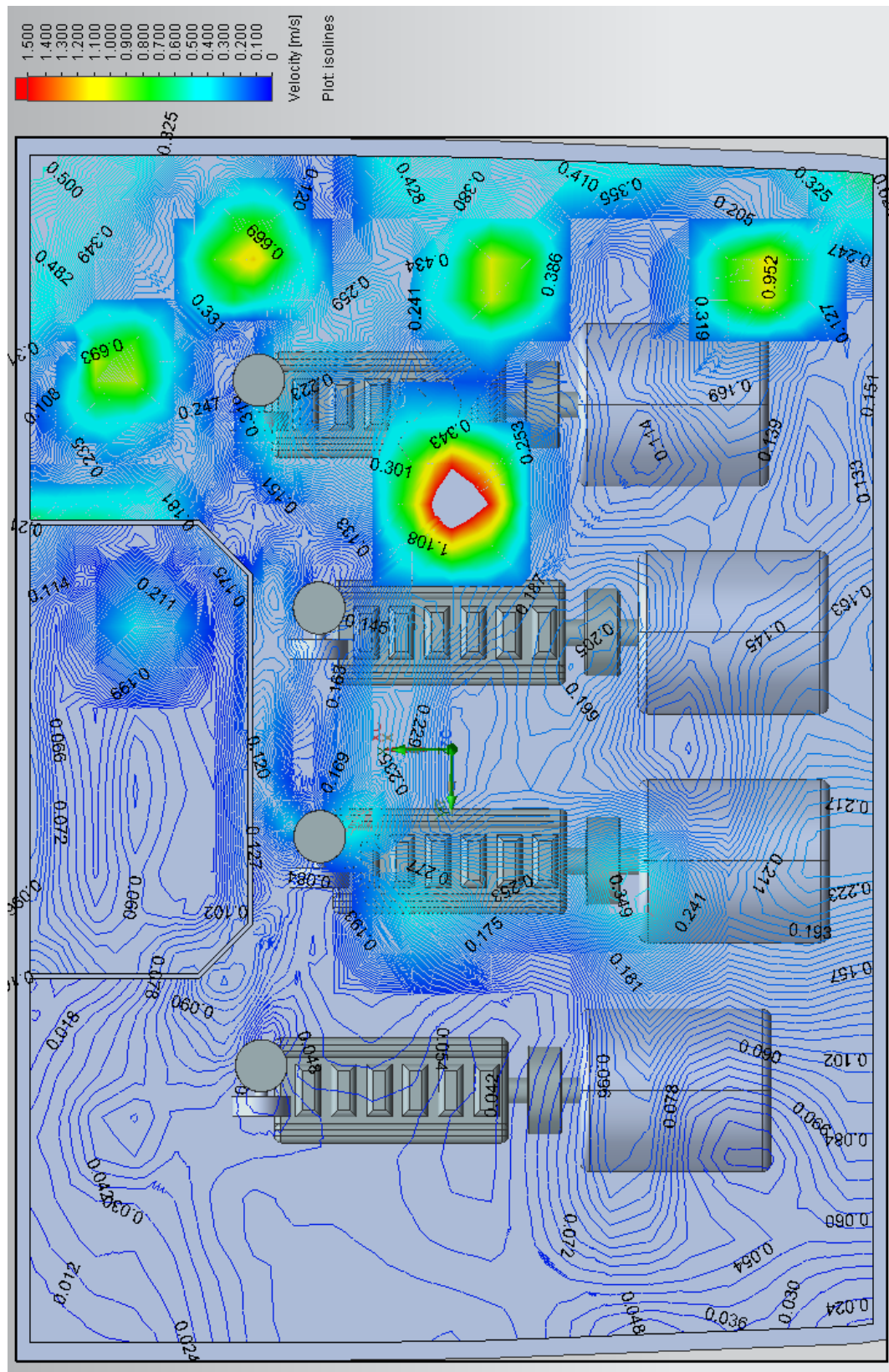


Fig. 7.8. Velocidad del Aire en la Sala de Máquinas (15 ACH).

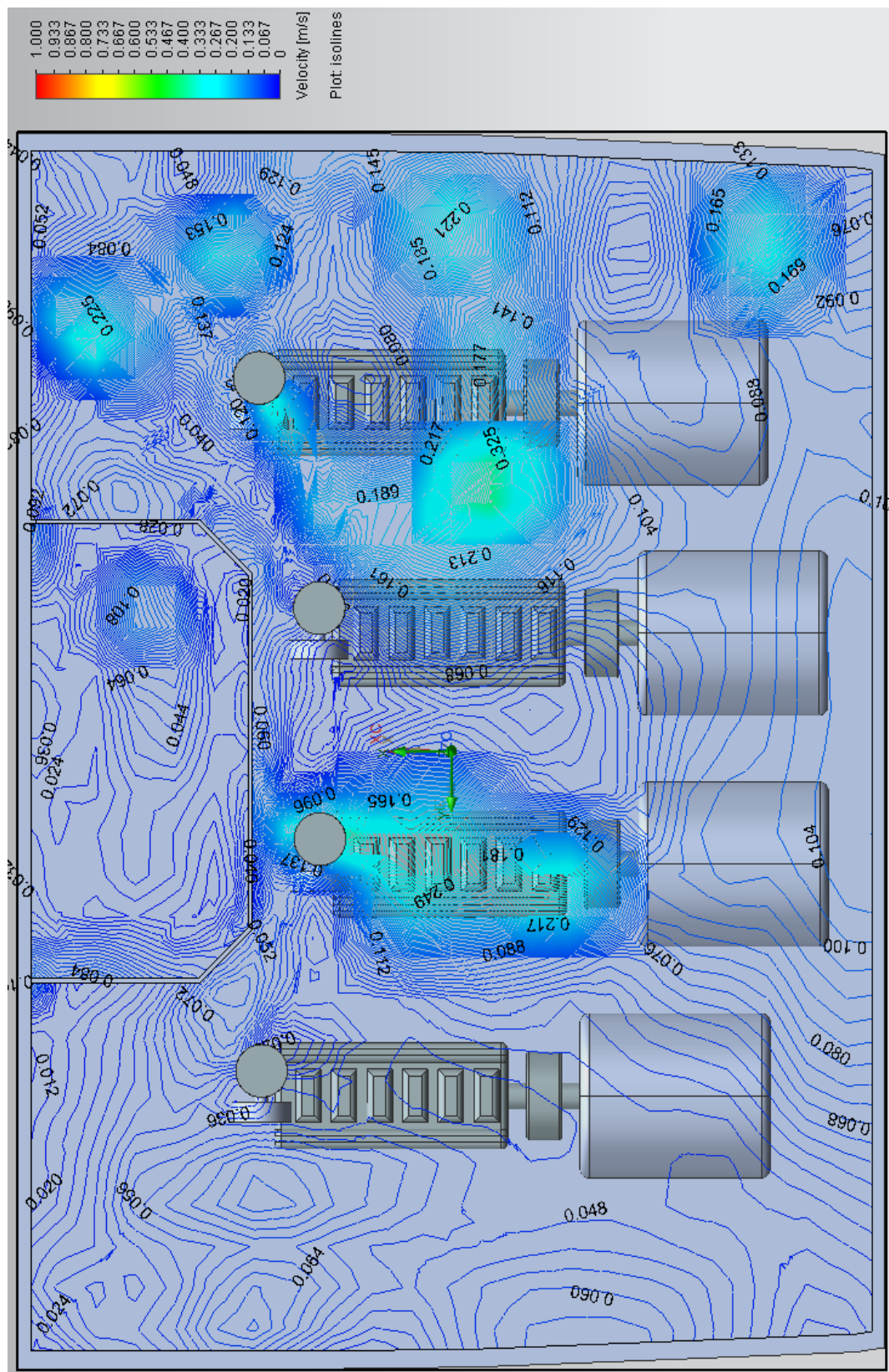


Fig. 7.9. Velocidad del Aire en la Sala de Máquinas (1,5 ACH).

7.4. Referencias

- [7.1] Base de datos del Astillero Hijos de José Barreras: <http://www.hjbarreras.es/?page=lis-offshore&idp=44> (Acceso septiembre 2016).
- [7.2] Contaminación atmosférica, eficiencia energética y emisiones de gases de efecto invernadero: <http://www.imo.org/es/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Paginas/Default.aspx> (Acceso septiembre 2016).
- [7.3] F. P. Ellis. Environmental factors influencing health and efficiency in warships. British Medical Journal, vol. 1(4551), pp. 587-592, 1948.
- [7.4] Demand Controlled Ventilation. Efficient Ventilation Systems. Soler & Palau, 2015.
- [7.5] LEKM7146-01 Ventilation & Exhaust System. Marine Engines Application and Installation Guide. Caterpillar, 2002.
- [7.6] J. A. Orosa, R. Santos y J. A. Pérez. A practical case study of the relationship between work risk prevention and fatigue at work in spanish merchant ships. Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries, vol. 21(5), pp. 484-492, 2011.
- [7.7] J. A. Pérez, J. A. Orosa y T. Grueiro. A three-dimensional CFD simulation study to reduce heat stress in ships. Applied Thermal Engineering, vol. 94, pp. 413-420, 2016.

PARTE IV

CONCLUSIONES

CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES

8.1. Conclusiones

La presente tesis doctoral presenta un completo estudio de las condiciones de trabajo en la sala de máquinas de un buque moderno, un excelente ejemplo de ambiente interior extremo, en el que frecuentemente las condiciones de servicio de los equipos y personas que trabajan en dicha instalación superan ampliamente los límites admisibles.

Hasta la actualidad, dicha problemática no ha sido tratada con el rigor y profundidad requeridos, ni por parte de las normativas y recomendaciones oficiales, ni por parte de los propios diseñadores y usuarios, aun cuando los efectos de la exposición del cuerpo humano a altas temperaturas son relativamente conocidos.

En este sentido, todavía hoy existe un elevado desconocimiento acerca de las condiciones reales de trabajo en la sala de máquinas y su consecuente influencia tanto en el desempeño y eficacia de las tareas ejecutadas, como fundamentalmente en la seguridad y salud del personal que allí trabaja.

Como consecuencia, optimizar el ambiente interior en un buque requiere un exhaustivo análisis y comprensión de las condiciones reales de servicio, con el objeto de desarrollar una metodología eficaz que permita establecer las condiciones óptimas para que el personal de abordaje pueda desempeñar sus tareas de forma eficaz y segura, con el mínimo consumo posible de energía en los equipos e instalaciones.

En base a estas consideraciones, la investigación desarrollada establece una metodología innovadora para el análisis y optimización energética de entornos industriales extremos, capaz de combinar eficazmente los criterios de eficiencia energética con el cumplimiento de los requisitos y disposiciones vigentes en materia de riesgos laborales y seguridad e higiene en el trabajo.

Dicha metodología, basada en un análisis CFD tridimensional completo de la sala de máquinas de un buque moderno, permite detectar fácilmente las áreas donde el estrés térmico puede representar un claro riesgo para los trabajadores, teniendo en cuenta las características específicas del entorno y las tareas a desarrollar.

Una vez identificados los puntos críticos, mediante el análisis CFD se ha analizado la variación de las condiciones térmicas en función del régimen de funcionamiento del sistema de ventilación en términos del número de renovaciones de aire por hora, ACH.

Este análisis constituye la base fundamental para la estimación de los tiempos de trabajo máximos aceptables de acuerdo con las normas NTP 350 e ISO 7933, así como los correspondientes tiempos de descanso en base a la NTP 18, para los distintos regímenes de ventilación considerados.

Finalmente, en base al análisis anterior se ha propuesto un algoritmo de control simple y eficaz para el sistema de ventilación, con el fin de optimizar las condiciones interiores antes del comienzo de cada tarea, logrando reducir el consumo de energía diario a aproximadamente un 30% del valor nominal, sin ningún menoscabo en la seguridad y la salud de los individuos que allí trabajan.

Además, de un modo complementario, la metodología propuesta permite detectar de un modo simple y eficaz disfunciones en la organización y planificación de tareas del personal de la sala de máquinas y adoptar las medidas correctivas pertinentes.

Como conclusión final, la metodología propuesta constituye un excelente ejemplo práctico de como la tecnología y el análisis térmico pueden contribuir no solo a obtener importantes ahorros de energía, sino también a mejorar significativamente las condiciones laborales de los individuos y por consiguiente a la mejora de su calidad de vida.

8.2. Principales Contribuciones a la Discusión

La presente tesis doctoral analiza en profundidad todos los aspectos relacionados con el funcionamiento del sistema de ventilación y el consumo de energía en ambientes interiores industriales extremos, tomando como referencia la sala de máquinas de un buque cablero de última generación.

Teniendo en cuenta la amplitud y complejidad del tema, además de aspectos puramente energéticos, es necesario tener en cuenta las disposiciones vigentes en materia de seguridad e higiene en el trabajo, de tal modo que el presente análisis se centra en tres aspectos clave:

- Análisis y caracterización de las condiciones térmicas de la sala de máquinas, en base a un modelo CFD tridimensional validado experimentalmente con datos reales de navegación.
- Análisis de las tareas a efectuar por el personal y mejora de las condiciones de trabajo del mismo.
- Optimización energética del sistema.

Entre las principales aportaciones originales a la discusión cabe destacar el establecimiento de una novedosa metodología para el análisis y optimización energética de entornos extremos, capaz de combinar eficazmente los criterios de eficiencia energética con el cumplimiento de los requisitos y disposiciones vigentes en materia de seguridad e higiene en el trabajo.

Por sus características, la metodología propuesta es directamente extrapolable a toda clase de instalaciones industriales, siendo fácilmente aplicable tanto durante el diseño de nuevas instalaciones, como también para la optimización y mejora de instalaciones ya en servicio.

De un modo complementario, la metodología propuesta permite detectar eficazmente disfunciones en la organización y planificación de tareas del personal de la sala de máquinas y adoptar las medidas correctivas pertinentes.

En definitiva, la metodología propuesta constituye un interesante punto de partida para la formulación de nuevos estándares y normativas que permitan controlar y mejorar las condiciones interiores en buques, tanto de nueva construcción como en servicio activo.

8.3. Líneas de Futuro Desarrollo

En base al conocimiento de la materia adquirido durante la realización de la presente tesis doctoral y teniendo en cuenta la imposibilidad práctica de abarcar en un solo estudio todas las posibles líneas de investigación en la materia, a continuación se proponen una serie de aspectos en los que sería interesante profundizar en futuros estudios:

- Desarrollo de modelos matemáticos del sistema de ventilación de la sala de máquinas que permitan el desarrollo de nuevos algoritmos de control más eficientes.
- Desarrollo de algoritmos de control del sistema en tiempo real más eficaces, basados en las últimas técnicas de modelado y control no lineal.
- Propuesta de nuevos estándares y normativas para controlar y mejorar las condiciones interiores en buques, tanto de nueva construcción, como en servicio activo.

PARTE V

REFERENCIAS

REFERENCIAS

Durante la elaboración de la presente Tesis Doctoral se han empleado entre otros los siguientes textos de consulta:

- [1] Ambiente Térmico (calor y frío). Dirección de Seguridad y Salud de ASEPEYO, 2005.
- [2] American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers HVAC Fundamentals. ASHRAE, 1985.
- [3] J. D. Anderson. Computational fluid dynamics: the basics with applications. McGraw Hill, 1995.
- [4] L. M. Azcuénaga. Manual Práctico para la Investigación de Accidentes Laborales. Asociación para la Prevención de Accidentes, 2001.
- [5] N. Barkhudaryan, J. A. Orosa y G. Roshan. A new procedure to analyze the effect of air changes in building energy consumption. Journal of Environmental Health Science and Engineering, vol. 12(37), 2014.
- [6] Base de datos del Astillero Hijos de José Barreras: <http://www.hjbarreras.es/?page=lis-offshore&idp=44> (Acceso septiembre 2016) [3.1] [5.1] [7.1].
- [7] H. S. Belding y T. F. Hatch. Index for Evaluating Heat Stress in Terms of Resulting Physiological Strains. Heating, Piping & Air Conditioning, vol. 27, pp. 129-136, 1955 [4.1].
- [8] Contaminación atmosférica, eficiencia energética y emisiones de gases de efecto invernadero: <http://www.imo.org/es/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Paginas/Default.aspx> (Acceso septiembre 2016) [2.1] [3.2] [5.2] [7.2].
- [9] Convenio Internacional para prevenir la contaminación por los Buques, MARPOL. Organización Marítima Internacional, 1973 [2.2] [3.3].
- [10] A. Crespo. Mecánica de Fluidos. Servicio de publicaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Madrid, 1992.
- [11] Demand Controlled Ventilation. Efficient Ventilation Systems. Soler & Palau, 2015 [7.4].
- [12] F. P. Ellis. Environmental factors influencing health and efficiency in warships. British Medical Journal, vol. 1(4551), pp. 587-592, 1948 [2.3] [7.3].
- [13] P. O. Fanger. Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. Ed. McGraw-Hill, 1970 [2.4] [4.2].

- [14] FloEFD for NX. Technical Reference. Mentor Graphics Corporation, 2015 [3.4] [5.3].
- [15] M. García y J. R. Sanz. Seguridad Marítima y Medio Ambiente. Instituto Universitario de Estudios Marítimos, Netbiblo, 2006. ISBN:978-84-9745-154-3.
- [16] P. Gilbert y A. Bows. Exploring the scope for complementary sub-global policy to mitigate CO₂ from shipping. Energy Policy, vol. 50, pp. 613-622, 2012 [2.5].
- [17] D. R. González-Llanos. Estudio Analítico e Influencia de la Seguridad en Buques Mercantes y de Pasaje. Tesis Doctoral, Universidad de La Coruña, 2015.
- [18] Green Verter. Schneider Electric, 2015.
- [19] G. F. Haines y T. F. Hatch. Industrial heat exposures-evaluation and control. Heating and ventilating, vol. 49(11), pp. 93-104, 1952.
- [20] H. L. Hansen y G. Pedersen. Influence of occupational accidents and deaths related to lifestyle on mortality among merchant seafarers. International Journal of Epidemiology, vol. 25(6), pp. 1237-1243, 1996 [2.6].
- [21] Hoja de características técnicas anemómetro Testo 425: https://www.testo.org/resources/e8/aa/d818fe5983b6/cat_testo_425.pdf (Acceso septiembre 2016) [3.5].
- [22] Hoja de características técnicas cámara termográfica Fluke TI 30: <http://www.fluke.com/fluke/eses/termografia/fluke-ti30.htm?pid=56183> (Acceso septiembre 2016) [3.6].
- [23] Hoja de características técnicas Gemini Datalogger Tinytag Plus 2 TGP-4020: <http://www.interworldna.com/images/gemini/pdf/TGP-4020.pdf> (Acceso septiembre 2016) [3.7].
- [24] Hoja de características técnicas Gemini Datalogger Tinytag Plus 2 TGP-4505: <http://www.interworldna.com/images/gemini/pdf/tgp-4505.pdf> (Acceso septiembre 2016) [3.8].
- [25] ILO Accident prevention on board a ship at sea and in port. An ILO code on practice (ISBN 92-2-109450-2). Organización Internacional del Trabajo, Ginebra, 1996 [2.7] [4.3].
- [26] IMO MSC/circ. 834, Guidelines for the engine-room layout, design and arrangement. Organización Marítima Internacional, 1998 [2.8] [4.4].
- [27] Installation Guide for Diesel Engines. Ship segment. Deutz AG, 2001.

REFERENCIAS

- [28] International Hazard Datasheets on Occupation, Ship-engineer (machinist): http://www.ilo.org/safework/cis/WCMS_193081/lang--en/index.html (Acceso septiembre 2016) [2.9] [4.5].
- [29] International Maritime Organization Guidance on fatigue: <https://www.gov.uk/government/publications/international-maritime-organization-imo-guidance-on-fatigue.html> (Acceso septiembre 2016) [2.10] [4.6].
- [30] O. C. Jensen, J. F. L. Sorensen, M. L. Canals, Y. Hu, N. Nikolic y A. A. Mozer. Non-fatal occupational injuries related to slips, trips and falls in seafaring. American Journal of Industrial Medicine, vol. 47, pp. 161-171, 2005 [2.11].
- [31] M. Kazkaz y M. Pavelek. Operative temperature and globe temperature. Engineering Mechanics, vol. 20(3-4), pp. 319-325, 2013 [5.4].
- [32] S. S. Kima y Y. G. Leeb. Field measurement of indoor air pollutant concentrations on two new ships. Building and Environment, vol. 45(10), pp. 2141-2147, 2010.
- [33] K. Lai, C. Wong, Y. Lun y T. Cheng. Shipping design for compliance and the performance contingencies for shipping firms. Transportation Research Part E, vol. 55, pp. 74-83, 2013 [2.12].
- [34] LEKM7146-01 Ventilation & Exhaust System. Marine Engines Application and Installation Guide. Caterpillar, 2002 [7.5].
- [35] Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales [4.7].
- [36] J. L. Louro. Trabajo a Bordo y Siniestralidad Laboral: Condiciones de Seguridad y Salud en los Buques. Tesis Doctoral, Universidad de La Coruña, 2006.
- [37] M. Lundh, M. Lützhöft, L. Rydstedt y J. Dahlman. Working conditions in the engine department. A qualitative study among engine room personnel on board Swedish merchant ships. Applied Ergonomics, vol. 42, pp. 384-390, 2011.
- [38] S. C. Mallam, M. Lundh, S. N. MacKinnon. Integrating Human Factors & Ergonomics in large-scale engineering projects: Investigating a practical approach for ship design. International Journal of Industrial Ergonomics, vol. 50, pp. 62-72, 2015.
- [39] J. S. McKarns y R. S. Brief. Nomographs Gives Refined Estimate of HSI. Heating, Piping & Air Conditioning, vol. 38, pp. 113-116, 1966 [4.8].

- [40] N. J. Méry y J. McGregor. Designing efficient and safe machinery spaces for merchant ships: a human factors approach. The Bulletin Technique of Bureau Veritas, 2009 [2.13].
- [41] P. R. Mondelo, E. G. Torada, S. Comas, E. Castejón y E. Bartolomé. Ergonomía 2, Confort y estrés térmico. Mutua Universal y Ediciones UPC, 1999. ISBN: 84-8301-316-9 [4.9].
- [42] J. M. Montero. Análisis Sociológico de los Accidentes Laborales. El Sector Marítimo-Pesquero. Instituto Social de la Marina. Ministerio de Trabajo y Seguridad Social. Secretaría General para la Seguridad Social, 1986.
- [43] J. Moreno, F. Calderay, N. Saborido, M. Boile, R. Rodríguez y V. Durán. Methodologies for estimating shipping emissions and energy consumption: A comparative analysis of current methods. Energy, vol. 86, pp. 603-616, 2015.
- [44] M. Nematchoua, R. Tchinda y J. A. Orosa. Adaptation and comparative study of thermal comfort in naturally ventilated classrooms and buildings in the wet tropical zones, Energy and Buildings, vol. 85, pp. 321-328, 2014.
- [45] W. Newton, M. Lewis, D. Carswell, N. P. Lavery, B. Evans, D. Bould y J. Sienz. Investigating the thermal profile of a marine vessel engine room through simulation with field measurements. Applied Thermal Engineering vol. 73, pp. 1360-1370, 2014.
- [46] P. V. Nielsen. Fifty years of CFD for room air distribution. Building and Environment, vol. 91, pp. 78-90, 2015 [3.9].
- [47] NTP 18. Estrés térmico. Evaluación de las exposiciones muy intensas: http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/001a100/ntp_018.pdf (Acceso septiembre 2016) [2.14] [4.10] [6.1].
- [48] NTP 74. Confort térmico. Método de Fanger para su evaluación: http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/001a100/ntp_074.pdf (Acceso septiembre 2016) [4.11].
- [49] NTP 322. Valoración del riesgo de estrés térmico: índice WBGT: http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/301a400/ntp_322.pdf (Acceso septiembre 2016) [4.12].
- [50] NTP 323. Determinación del metabolismo energético: http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/301a400/ntp_323.pdf (Acceso septiembre 2016) [4.13].

- [51] NTP 350. Evaluación del estrés térmico. Índice de sudoración requerida: http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/301a400/ntp_350.pdf (Acceso septiembre 2016) [2.15] [4.14] [6.2].
- [52] NTP 779. Bienestar térmico: criterios para ambientes térmicos confortables: <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/752a783/nTP-779.pdf> (Acceso septiembre 2016) [4.15].
- [53] NTP 922. Estrés térmico y sobrecarga térmica: evaluación de los riesgos (I): <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/NTP/NTP/Ficheros/891a925/922w.pdf> (Acceso septiembre 2016) [4.16] [6.3].
- [54] NTP 923. Estrés térmico y sobrecarga térmica: evaluación de los riesgos (II): <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/NTP/NTP/Ficheros/891a925/923w.pdf> (Acceso septiembre 2016) [4.17].
- [55] P. J. O'Connor y N. O'Connor. Work related maritime fatalities. Accident Analysis & Prevention, vol. 38(4), pp. 737-741, 2006.
- [56] J. A. Orosa. A new modelling methodology to control HVAC systems. Expert Systems with Applications, vol. 38(4), pp. 4505-4513, 2011.
- [57] J. A. Orosa. Indoor Ambiences in Spanish Merchant Ships. Proceedings of the 3rd International Conference on Maritime and Naval Science and Engineering, Constantza (Rumania), pp. 12-16, 2010.
- [58] J. A. Orosa y J. Álvarez. A new control engine room thermal comfort control system. Proceedings of the 2nd International Conference on Maritime and Naval Science and Engineering, Brasov (Rumania), pp. 31-34, 2009.
- [59] J. A. Orosa y A. Baaliña. Improving PAQ and comfort conditions in Spanish office buildings with passive climate control. Building and Environment, vol. 44(3), pp. 502-508, 2009.
- [60] J. A. Orosa y A. Baaliña. Passive climate control in Spanish office buildings for long periods of time. Building and Environment, vol. 43(12), pp. 2005-2012, 2008.
- [61] J. A. Orosa y A. C. Oliveira. A field study on building inertia and its effects on indoor thermal environment. Renewable Energy, vol. 37(1), pp. 89-96, 2012.
- [62] J. A. Orosa y A. C. Oliveira. A new thermal comfort approach comparing adaptive and PMV models. Renewable Energy, vol. 36(3), pp. 951-956, 2011.

- [63] J. A. Orosa y A. C. Oliveira. A new understanding of building energy consumption. *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research*, vol. 29(1), pp. 531-542, 2012.
- [64] J. A. Orosa y A. C. Oliveira. Assessment of work related risk criteria on board a ship as an aid to designing its onboard environment, *Journal of Marine Science and Technology*, vol. 15 (1), pp. 16-22, 2010 [2.16] [4.18].
- [65] J. A. Orosa y A. C. Oliveira. Case study of safe working conditions in spanish merchant ships. *Polish Maritime Research*, vol. 19(2), pp. 43-48, 2012.
- [66] J. A. Orosa y A. C. Oliveira. Energy saving with passive climate control methods in Spanish office buildings. *Energy and Buildings*, vol. 41(8), pp. 823-828, 2009.
- [67] J. A. Orosa y A. C. Oliveira. Reducing energy peak consumption with passive climate control methods. *Energy and Buildings*, vol. 43(9), pp. 2282-2288, 2011.
- [68] J. A. Orosa y J. A. Pérez. *Termodinámica Aplicada con EES*. Tórculo Ediciones, 2008 [4.19].
- [69] J. A. Orosa, R. Santos y J. A. Pérez. A practical case study of the relationship between work risk prevention and fatigue at work in spanish merchant ships. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, vol. 21(5), pp. 484-492, 2011 [2.17] [6.4] [7.6].
- [70] Página web Autodesk: <http://www.autodesk.es/> (Acceso septiembre 2016) [3.10].
- [71] Página web Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, INSHT: <http://www.insht.es/portal/site/Insht/> (Acceso septiembre 2016) [4.20].
- [72] Página web Mentor Graphics Floefd for NX: <https://www.mentor.com/products/mechanical/floefd/floefd-nx/> (Acceso septiembre 2016) [3.11] [5.5].
- [73] Página web Siemens NX: https://www.plm.automation.siemens.com/es_es/products/nx/ (Acceso septiembre 2016) [3.12] [5.6].
- [74] Página web Siemens Solid Edge ST: https://www.plm.automation.siemens.com/es_es/products/solid-edge/ (Acceso septiembre 2016) [3.13] [5.7].
- [75] K. C. Parsons. International standards for the assessment of the risk of thermal strain on clothed workers in hot environments. *Annals of Occupational Hygiene*, vol. 43(5), pp. 297-308, 1999.

- [76] J. A. Pérez, M. González y D. Dopico. Adaptive neurofuzzy ANFIS modelling of laser surface treatments. *Neural Computing and Applications*, vol. 19(1), pp. 85-90, 2010.
- [77] J. A. Pérez, J. L. Ocaña y C. Molpeceres. Hybrid fuzzy logic control of laser surface heat treatments. *Applied Surface Science*, vol. 254(4), pp. 879-883, 2007.
- [78] J. A. Pérez y J. A. Orosa. Neural modeling of laser surface treatments. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 46(5-8), pp. 605-610, 2010.
- [79] J. A. Pérez, J. A. Orosa y T. Grueiro. A three-dimensional CFD simulation study to reduce heat stress in ships. *Applied Thermal Engineering*, vol. 94, pp. 413-420, 2016 [2.18] [3.14] [4.21] [5.8] [6.5] [7.7].
- [80] Real Decreto 486/1997, de 14 de abril, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo [4.22].
- [81] S. E. Roberts y P. B. Marlow. Traumatic work-related mortality among seafarers employed in British merchant shipping: 1976-2002, *Occupational & Environmental Medicine*, vol. 62(3), pp. 172-180, 2005 [2.19].
- [82] Rojon y C. Dieperink. Blowing in the wind? Drivers and barriers for the uptake of wind propulsion in international shipping. *Energy Policy*, vol. 67, pp. 394-402, 2014 [2.20].
- [83] R. Sagarra, E. González y J. Sánchez. Técnicas de Prevención en Seguridad e Higiene del Trabajo a Bordo. 2ª ed. Instituto Social de la Marina, 1990. ISBN: 978-84-86817-05-6.
- [84] K. Shaari, K. Zilati y M. Awang. Engineering applications of computational fluid dynamics. Springer, 2015.
- [85] UNE EN ISO 7726:2002. Ergonomía de los ambientes térmicos. Instrumentos de medida de las magnitudes físicas [4.23].
- [86] UNE EN ISO 7730:2006. Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local [4.24].
- [87] UNE EN ISO 7933:2005. Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del estrés térmico mediante el cálculo de la sobrecarga térmica estimada [4.25].
- [88] UNE EN ISO 8996:2005. Ergonomía del ambiente térmico. Determinación de la tasa metabólica [4.26].

- [89] UNE EN ISO 9886:2004. Ergonomía. Evaluación de la sobrecarga térmica mediante mediciones fisiológicas [4.27].
- [90] UNE EN ISO 9920:2009. Ergonomía del ambiente térmico. Determinación del aislamiento de la vestimenta. Estimación del aislamiento térmico y de la resistencia a la evaporación de un conjunto de ropa [4.28].
- [91] UNE EN 27243:1995. Ambientes calurosos. Estimación del estrés térmico del hombre en el trabajo basado en el índice WBGT (Temperatura húmeda y temperatura de globo) (ISO 7243:1989) [2.21] [4.29].
- [92] J. Wang. The current status and future aspects in formal ship safety assessment. *Safety Science*, vol. 38(1), pp. 19-30, 2001.
- [93] J. Wang. Offshore safety approach and formal safety assessment of ships. *Journal of Safety Research*, vol. 33(1), pp. 81-115, 2002.
- [94] J. F. Wendt. *Computational fluid dynamics: an introduction*. 3th ed. Springer, 2009.
- [95] S. Xing, Y. Xinping, W. Bing y S. Xin. Analysis of the operational energy efficiency for inland river ships. *Transportation Research Part D*, vol. 22, pp. 34-39, 2013 [2.22].
- [96] Z. L. Yang, J. Wang, S. Bonsall y Q. G. Fang. Use of fuzzy evidential reasoning in maritime security assessment. *Risk Analysis*, vol. 29(1), pp. 95-120, 2009.

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

CAPÍTULO 2:

Figuras:

Fig. 2.1. Balance Térmico del Cuerpo Humano.

CAPÍTULO 3:

Figuras:

Fig. 3.1. Buque Cablero Teneo.

Fig. 3.2. Buque Cablero Teneo.

Fig. 3.3. Plano Constructivo de la Sala de Máquinas.

Fig. 3.4. Vista General de la Sala de Máquinas.

Fig. 3.5. Distribución de la Ventilación en la Cámara de Máquinas.

Fig. 3.6. Situación de la Sala de Control.

Fig. 3.7. Dataloggers Gemini TinyTag Plus 2 TGP-4505 y TGP-4020.

Fig. 3.8. Anemómetro Testo 425.

Fig. 3.9. Cámara Térmica Fluke TI 30.

Fig. 3.10. Software de Procesado de Imágenes Fluke Inside IR.

Fig. 3.11. Imagen Termográfica de la Sala de Máquinas.

Fig. 3.12. Software de Modelado 3D Siemens Solid Edge ST7.

Fig. 3.13. Modelo 3D de la Sala de Máquinas.

Fig. 3.14. Software de Análisis 3D Siemens NX.

Fig. 3.15. Software de Simulación y Análisis CFD FloEFD.

Tablas:

Tabla 3.1. Características del Buque Teneo.

Tabla 3.2. Características Dataloggers Gemini TinyTag Plus 2.

Tabla 3.3. Características Anemómetro Testo 425.

Tabla 3.4. Características Cámara Térmica Fluke TI 30.

CAPÍTULO 4:

Figuras:

Fig. 4.1. Diagrama Psicrométrico.

Fig. 4.2. Valores Límite para el Índice WBGT.

Tablas:

Tabla 4.1. Valores Típicos de Aislamiento Térmico Intrínseco.

Tabla 4.2. Valores de Referencia.

Tabla 4.3. Escala para la Valoración del Índice IST.

Tabla 4.4. Estimación de la Temperatura de Rocío.

Tabla 4.5. Escala de Sensación Térmica.

Tabla 4.6. Categorías de Ambiente Térmico.

CAPÍTULO 5:

Figuras:

Fig. 5.1. Vista General de la Sala de Máquinas.

Fig. 5.2. Modelo 3D de la Sala de Máquinas.

Fig. 5.3. Imagen Térmica de uno de los Motores en Funcionamiento.

Fig. 5.4. Imagen Térmica de uno de los Alternadores en Servicio.

Fig. 5.5. Temperatura Interior en la Sala de Máquinas (6 ACH).

Fig. 5.6. Humedad Relativa en la Sala de Máquinas (6 ACH).

Fig. 5.7. Temperatura Operativa en la Sala de Máquinas (6 ACH).

Fig. 5.8. Velocidad del Aire en la Sala de Máquinas (6 ACH).

Fig. 5.9. Temperatura Interior vs. Renovaciones de Aire (ACH).

Fig. 5.10. Humedad Relativa vs. Renovaciones de Aire (ACH).

Fig. 5.11. Temperatura Operativa vs. Renovaciones de Aire (ACH).

Fig. 5.12. Velocidad del Aire vs. Renovaciones de Aire (ACH).

CAPÍTULO 6:

Figuras:

Fig. 6.1. Tiempo Máximo de Trabajo en la Sala de Máquinas.

Fig. 6.2. Programación Diaria de Tareas Revisada.

Fig. 6.3. Tiempo Máximo en la Sala de Máquinas.

Fig. 6.4. Tiempo Máximo en el Taller de Máquinas.

Fig. 6.5. Tiempo Mínimo de Recuperación.

Tablas:

Tabla 6.1. Programación Diaria de Tareas. Primera Guardia.

Tabla 6.2. Programación Diaria de Tareas. Segunda Guardia.

Tabla 6.3. Personal no Aclimatado. Nueva División de Tareas.

Tabla 6.4. Programación Diaria de Tareas Revisada. Primera Guardia.

Tabla 6.5. Programación Diaria de Tareas Revisada. Segunda Guardia.

Tabla 6.6. Principales Tareas a Desarrollar en la Sala de Máquinas.

Tabla 6.7. Principales Tareas a Desarrollar en el Taller de Máquinas.

CAPÍTULO 7:

Figuras:

Fig. 7.1. Rendimiento de los Equipos de Regulación.

Fig. 7.2. Temperatura Interior en la Sala de Máquinas (15 ACH).

Fig. 7.3. Temperatura Interior en la Sala de Máquinas (1,5 ACH).

Fig. 7.4. Humedad Relativa en la Sala de Máquinas (15 ACH).

Fig. 7.5. Humedad Relativa en la Sala de Máquinas (1,5 ACH).

Fig. 7.6. Temperatura Operativa en la Sala de Máquinas (15 ACH).

Fig. 7.7. Temperatura Operativa en la Sala de Máquinas (1,5 ACH).

Fig. 7.8. Velocidad del Aire en la Sala de Máquinas (15 ACH).

Fig. 7.9. Velocidad del Aire en la Sala de Máquinas (1,5 ACH).

Tablas:

Tabla 7.1. Consumo de Energía.

NOMENCLATURA

NOMENCLATURA

A:

ACH - Número de Renovaciones de Aire por Hora (Air changes per hour).

$\frac{A_r}{A_{DU}}$ - Fracción de superficie cutánea participante en el intercambio de calor por radiación.

C:

C - Calor intercambiado por convección.

CFD - Dinámica de Fluidos Computacional (Computational Fluid Dynamics).

c_p - Calor específico medio del organismo.

C_{resp} - Calor intercambiado por convección respiratoria.

D:

$D_{máx}$ - Máxima deshidratación admisible.

DEME - Dragado, Medio Ambiente e Ingeniería Marina.

E:

EEDI - Índice de Eficiencia Energética de Proyecto.

EEOI - Indicador Operacional de Eficiencia Energética.

$E_{máx}$ - Máxima evaporación permitida.

E_{req} - Evaporación requerida.

E_{resp} - Calor latente intercambiado por la respiración.

E_{sud} - Energía disipada por sudoración.

F:

F - Fuerza distribuida por unidad de masa.

F_{cl} - Factor adimensional de reducción de los intercambios de calor sensible debidos al atuendo.

F_{medio} - Fuerza distribuida debida a la resistencia del medio.

$F_{gravitación}$ - Fuerza distribuida debida a la gravedad.

$F_{rotación}$ - Fuerza distribuida debida a la rotación.

FPA - Matriz de Plano Focal.

H:

h - Entalpía.

h_c - Coeficiente de intercambio de calor por convección.

h_r - Coeficiente de radiación.

I:

I_{cl} - Aislamiento térmico intrínseco del atuendo.

IMO - Organización Marítima Internacional.

INSHT - Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.

ISC – Índice de Sobrecarga Calórica. Es equivalente al IST.

IST - Índice de Sobrecarga Térmica.

K:

K - Calor intercambiado por conducción.

M:

m - Masa del individuo.

M - Producción de energía metabólica (Metabolic rate).

MARPOL - Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques.

MECMA - Mediterranean Cable Maintenance Agreement.

MEPC - Comité de Protección del Medio Marino.

N:

NTP - Nota Técnica de Prevención.

O:

OIT - Organización Internacional del Trabajo.

P:

p - Presión.

p_{sk} - Presión de saturación de vapor de agua a la temperatura de la piel.

p_a - Presión parcial del vapor de agua a la temperatura ambiente.

PMV - Voto medio previsto (Predicted mean vote).

PPD - Porcentaje de Insatisfechos (Predicted percentage of dissatisfied).

Q:

Q_H - Calor aportado por unidad de volumen.

q_i - Flujo de calor.

$Q_{m\acute{a}x}$ - Calor máximo que puede acumular un individuo.

R:

R - Calor intercambiado por radiación.

R_t - Resistencia evaporativa total.

S:

S - Calor total acumulado por el organismo.

Sw_{req} - Sudoración requerida.

$Sw_{m\acute{a}x}$ - Sudoración máxima recomendada por la norma.

SEEMP - Plan de Eficiencia Energética en Buques.

T:

$t_{m\acute{a}x,ac}$ - Máximo tiempo admisible debido a la acumulación de calor.

$t_{m\acute{a}x,dh}$ - Máximo tiempo admisible debido al límite de deshidratación del organismo.

ΔT - Incremento de temperatura admisible.

T_a - Temperatura del aire.

T_g - Temperatura de globo.

T_h - Temperatura de bulbo húmedo.

T_r - Temperatura radiante.

T_{sk} - Temperatura cutánea.

U:

u - Velocidad del fluido.

W:

w_{req} - Humedad de la piel requerida.

W - Trabajo til.

WBGT - Temperatura húmeda y de globo (Wet bulbe globe temperature).

OTROS SÍMBOLOS:

ε_{sk} - Emisividad cutánea.

ρ - Densidad del fluido.

τ_{ij} - Tensor de resistencia viscosa.

τ_{ij}^R - Tensor de Reynolds.

σ - Constante de Stefan Boltzman.

Ω - Velocidad angular del sistema.

PUBLICACIONES DERIVADAS DE LA TESIS



Research Paper

A three-dimensional CFD simulation study to reduce heat stress in ships



José Antonio Pérez ^{a,*}, José Antonio Orosa ^b, Teresa Grueiro ^b

^a Department of Industrial Engineering II, Escuela Politécnica Superior, University of La Coruña (Spain), c. Mendizábal, s/n, 15403 Ferrol, La Coruña, Spain

^b Department of Energy and Marine Propulsion, University of La Coruña (Spain), E.T.S. Náutica y Máquinas, Paseo de Ronda 51, 15011 La Coruña, Spain

HIGHLIGHTS

- Extreme indoor ambience conditions in the engine room of merchant ships are analysed.
- Critical zones where heat stress could be a risk for personnel are identified.
- The main tasks developed in the different zones are characterised and considered.
- New solutions to improve engine room ambience conditions are proposed.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 16 April 2015

Accepted 1 November 2015

Available online 10 November 2015

Keywords:

Heat stress

Fatigue

Engine room

Thermal modelling

CFD

ABSTRACT

The present research shows a real case study of risk prevention during engine room work using a complete three-dimensional CFD thermal model. The results displayed the hottest points, and as a consequence the hazardous places in the engine room that are near the main engine turbocharger. The maximum time in the hottest places and the minimum time needed in the engine control room to release the accumulated heat were modelled in accordance with the tasks to be done under the hottest navigation conditions. Thus, a relationship between tasks and working places was obtained, allowing to develop low hazardous activities in the engine room, in such a way that these results could be an excellent initial guide for future standards in shipbuilding and operation.

© 2015 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Even when extreme indoor ambience conditions in the engine room of merchant ships show the highest number of accidents as a consequence of the associated risk conditions at work, from decades fatal accidents in the engine room were not directly related to these very extreme working conditions, and ambiguous terms such as ‘fatigue’ were employed in the literature to describe their consequences [1,2].

Intense heat stress can have fatal consequences on the human body; therefore, in extreme ambiances, it is necessary to strictly limit the time spent in such conditions, particularly when it is the working place, as reflected in modern safety standards [3].

In this sense, there are clear examples of extreme environments that need to be investigated in ships and related installations. One significant particular case is the engine room conditions, where an undetermined hazardous environment, with high temperatures, clearly over 35 °C, is obtained every moment during navigation, as a consequence of the heat released, principally by the main engine.

At the same time, tasks done by marine engineers can show an extremely high metabolic rate, which increases the health risk to new limits rarely shown in common working places, as happens for example when sampling the flexion of the main engine shaft during navigation.

Even when in the last few years the subjective concept of ‘fatigue’ has been translated to some objective procedures and indices, at present there is not yet a clear in-depth guide to design these very extreme ambiances as a consequence of a lack of research studies about the real work conditions in these indoor ambiances and their influence on the main activities developed there, using simple theoretical approaches that never converge with the real situations on board.

In this way, it must be emphasised that the International Labour Organization (ILO), and most of the related standards and datasheets, do not provide clear information about the suitable ambience in the engine room, in accordance with the tasks that are going to be developed [4–13].

In these standards, the engine room is defined by a simple representative point and only generic recommendations are given. Nevertheless, in real situations, different heat sources are placed in the engine room, and hence different thermal zones must be defined and analysed.

* Corresponding author. Tel.: +34 981167000 3252; fax: +34 981337410.

E-mail address: japerez@udc.es (J.A. Pérez).

<http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.11.001>

1359–4311/© 2015 Elsevier Ltd. All rights reserved.

In this way, it must be highlighted that only a few research studies can be found in the literature with Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations in their topic [14–18].

As a consequence of this, typically in industrial environments workers must define their own intercalated periods of activity and rest, based on common sense, in such a way that in certain circumstances, for instance, to complete a task and avoid a new period of exposure, the worker can prolong exposure to dangerous levels with a clear heat-stroke risk [19].

Besides, nowadays engine room temperature distributions are evolving due to new electrical propulsion equipment, where some little engines work simultaneously instead of only one big main engine, changing considerably the thermal distribution in the engine room, in such a way that it is really very interesting to predict this new engine room thermal conditions.



Fig. 1. Main engine room.

Table 1
Main tasks to be developed in the engine room.

Task	Metabolic rate (MET)	Heat from human body (W/m ²)	Clothing insulation (CLO)	Minimum time needed (min)
Visual inspection (per engine)	1.0	58.0	1	6
Monitoring oil levels	1.2	69.6	1	2
Cleaning filters (one filter)	2.0	116.0	1	30
Sampling main engine shaft flexion	3	174.0	1	30
Removing injectors	4	232.0	1	30

Table 2
Main tasks to be developed in the workshop.

Task	Metabolic rate (MET)	Heat from human body (W/m ²)	Clothing insulation (CLO)	Minimum time needed (min)
Calibration of injectors	1.0	58.0	1	15
Drilling	1.8	104.4	1	5
Turning	2.0	116.0	1	60
Welding	2.3	133.4	1	30
Cutting steel plates	3.5	203.0	1	20

In this sense, nowadays engineering has developed advanced tools with extraordinary applications that can be expected to be used in near future, as thermographic analysis and CFD resources. These tools are showing great yet to come applications, changing the understanding and design activities to a three-dimensional level and giving the chance to improve both future designs as well as existing conditions.

However, there is still a great lack of knowledge about the working conditions on board, because of the few researchers working on this topic and the difficulties to sample on board, making it very difficult to employ these tools [19,20].

In the present work, based on advanced CFD tools, an in-depth analysis has been done, showing the exact tasks and engine room zone conditions and their related hazards, developing a new methodology for these special ambiances, with the aim of forming a base for future recommendations and standards.

Specifically, based on the work-risk indices and CFD simulations, these extreme indoor conditions were defined for each working place of the engine room. Moreover, the maximum time that a marine engineer can be working in each place was defined as an example of the procedure to be employed, establishing a guide for operators to reduce the number of heat-stroke accidents.

2. Main engine room characterisation

2.1. Main engine and ventilation system

The present research analyses indoor ambiances in the engine room of an advanced electrical propulsion ship, where four engines of 1250 kW each one offer the electrical energy needed by two

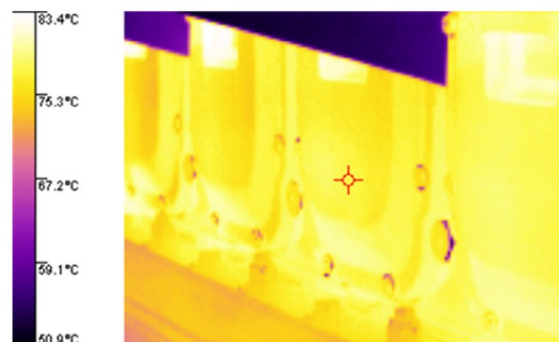


Fig. 2. Main engine thermographical photo.

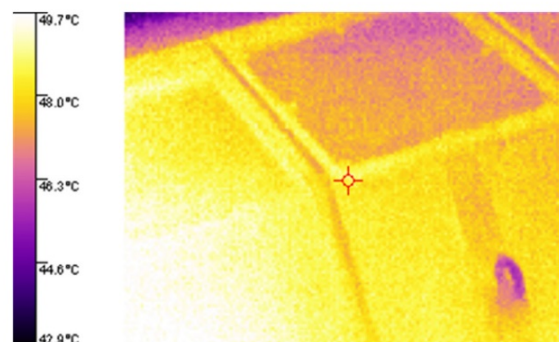


Fig. 3. Alternator thermographical photo.

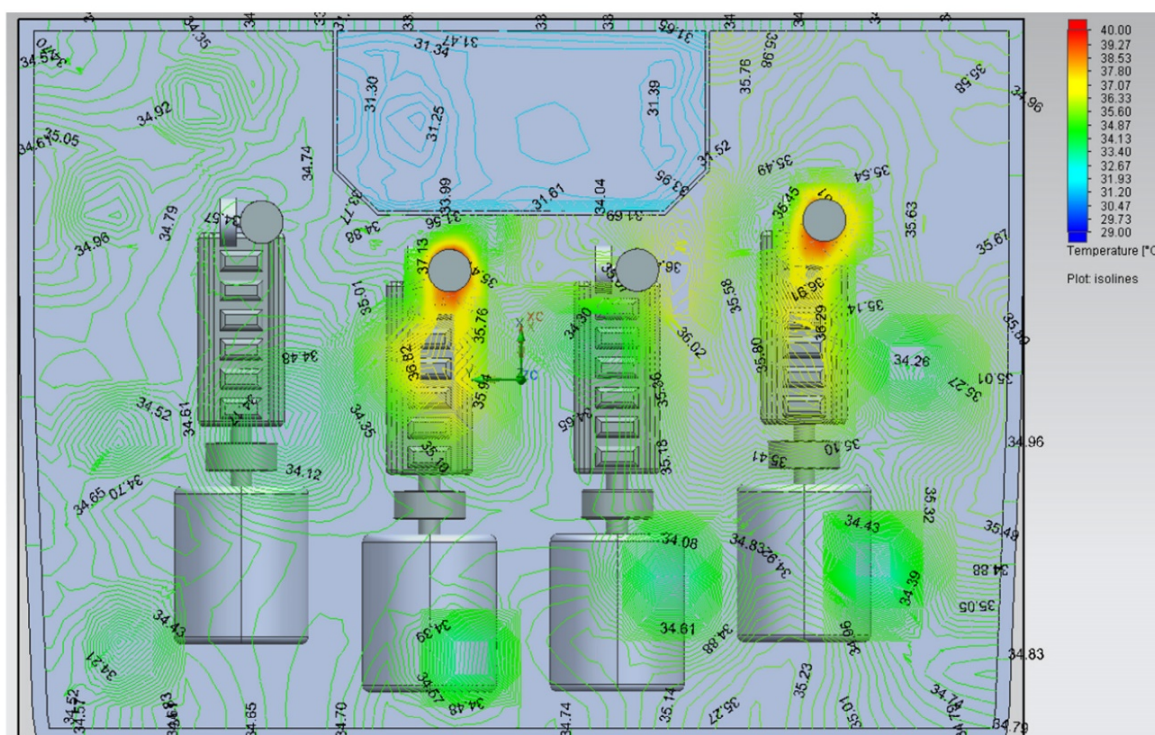


Fig. 4. Indoor air temperature in the main engine room.

identical electrical motors to move the propeller, as shown in Fig. 1. This particular engine room distribution was selected in accordance with the main advantages of electrical propulsion and the Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP), which recommends employing various main engines instead of one equivalent engine to reduce the consumption of energy [21].

In this distribution, the engine room generates a high amount of heat at different points, which must be evacuated by the ventilation system. In this sense, under normal conditions, the ventilation system removes six times the air volume of the engine room each hour, about 3500 m³/h, by nozzles placed over the main engine turbochargers and releases fresh air in significant places, such as over the alternators. Furthermore, during navigation all the ventilators are working, while in the port only a reduced part of them are employed as a consequence of the low heat released by the auxiliary engine.

Finally, it is interesting to note that despite the formal high interest shown in ventilation, to reduce the risk conditions at work, the activation and deactivation of ventilators are done using common sense and no recommendation was found in any standard.

On the other hand, the engine control room is the place where marine engineers monitor the main variables of the engine room using computers, under adequate indoor conditions, about 20 °C and 71% of relative humidity [20]. As a consequence of this comfortable ambience, typically, it is employed as a resting point to release the heat accumulated when working in the engine room.

2.2. Monitored variables

Indoor and outdoor air conditions, such as dry bulb temperature, relative humidity, pressure and air velocity, were sampled

during navigation on a daily basis. Calibrated Gemini data loggers and anemometer Testo 425 were employed to conduct this, with an accuracy of ± 0.1 °C, 1% RH, 1 Pa, and 0.01 m/s, respectively. At the same time, the surface temperature of the main engines, alternators and bulkheads were sampled with a Testo 885-2 camera, with a thermal sensibility lower than 30 mK and a maximum sampling temperature of 1200 °C, which allows to sample the real surface temperature under navigation and validate the simulation process.

The indoor conditions were monitored during daily working tasks, when the ship was in the tropical region, at a temperature of 29 °C and a relative humidity of 90%. Under these conditions the main engine room average indoor temperature was nearly 31 °C, relative humidity 77%, and the pressure about 1 bar. At the same time, the surface temperature in the engines was about 77.5 °C and 47.8 °C in the alternators.

2.3. Engine room simulations

A complete three-dimensional model of the engine room was created using Solid Edge ST7 and simulated with Mentor Graphics FloEFD 13.2.0. This advanced software was selected because it allowed the simulation of indoor ambience variables not usually considered by classical CFD tools, such as relative humidity and moist air-phase change, among others.

The simulations reproduce the real navigation conditions in tropical regions, with two main engines working, to predict indoor conditions.

The simulation mesh was especially designed to define the indoor conditions with great definition in two special places: near the turbochargers and in the workshop. At the same time, as the engine

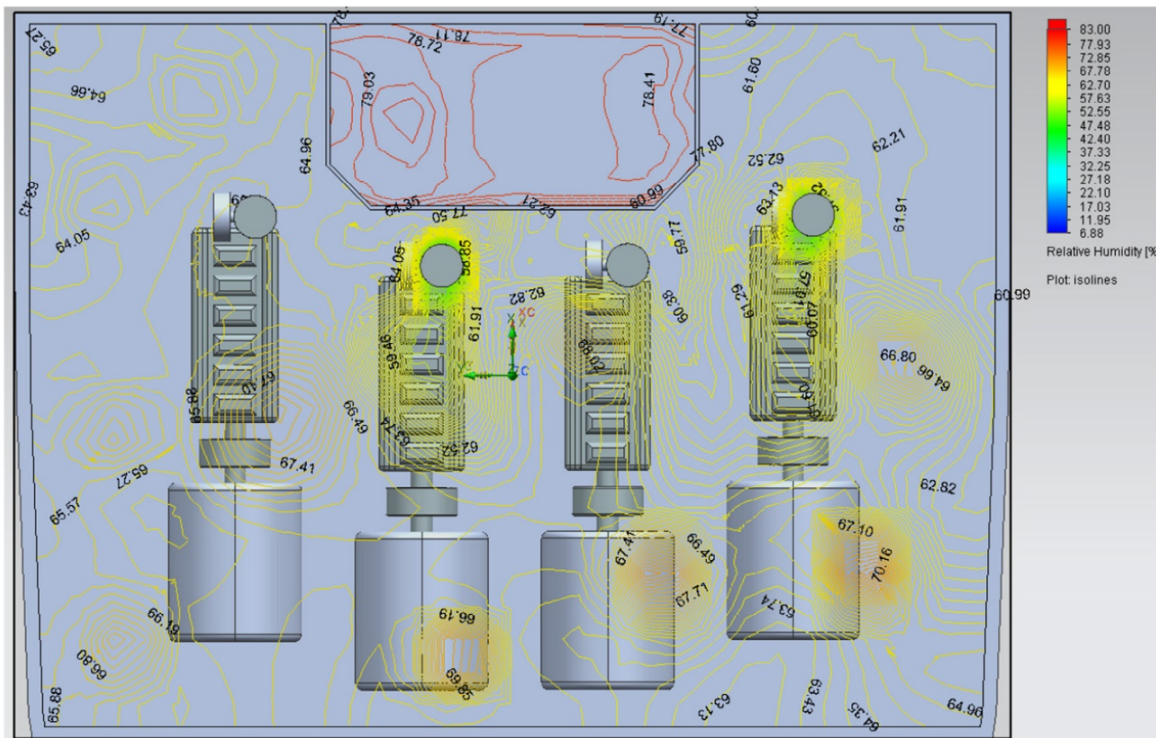


Fig. 5. Indoor air relative humidity in the main engine room.

room showed a platform over which marine engineers walk, it was considered to test these variables 1.5 m over this platform, which corresponds approximately to the height of the centre of mass of an individual over the platform.

Considering the extremely good insulation employed in the bulkheads, it could be assumed that no heat would transfer through them.

Under these conditions, the time needed for each simulation with adequate accuracy was about five-and-a-half hours per simulation.

2.4. Heat stress: Maximum admissible work time

With the aim of focusing on critical engine room zones and not on average values, for this case study, two special points were selected, as these are the places where the crew invest most of their working hours under the most extreme conditions.

In this sense, one typical daily task that prevails in all merchant ships is to revise the most important engine working parameters. This process needs about six minutes per engine, where, under a low metabolic rate, a marine engineer is writing near the engine under the most extreme conditions, in particular near the turbocharger.

On the other hand, the workshop is a place specifically designed to develop different maintenance tasks during long time periods.

To facilitate the understanding of the activities on each zone, it has been collected in Tables 1 and 2 the most important tasks and physical hazards in the engine room and the workshop, respectively.

In this study, to define the maximum time that a marine engineer can be working in each place and the corresponding minimum

time needed to reduce its temperature in the engine control room, the NTP 18 standard was employed [3,10].

Even when it is not a compulsory standard, it shows an excellent guideline for these very extreme industrial environments, allowing to estimate not only the maximum time that an individual can work under extreme conditions, but also the minimum time that the individual must rest in a controlled environment to release the accumulated heat.

Essentially, this standard methodology is based on the estimation of heat exchange between man and his surrounding environment by convection, conduction, and radiation, in agreement with McKarns and Brief heat stress analysis, inspired in the heat stress index developed by Belding and Hatch [22–24].

In a first approach, some parameters can be considered constant, such as human weight (70 kg), insulation of clothes, and skin temperature (35 °C). Once the maximum capacity of the human body to release heat by sweating (E_{max}) under some extreme conditions is obtained, the heat that has to be released by the worker to reach the thermal equilibrium by evaporation (E_{req}) is calculated, in accordance with equation (1) [3]:

$$E_{req} = M + C + R \quad (1)$$

The difference between E_{req} and E_{max} is the net heat gained by the worker. Considering that the exposition must be finished once the body temperature increases around 1 °C, and an average specific heat of 3.42 kJ/(kg · K), it can be defined the maximum time (in minutes) that a worker can remain in that extreme environment by equation (2) [3]:

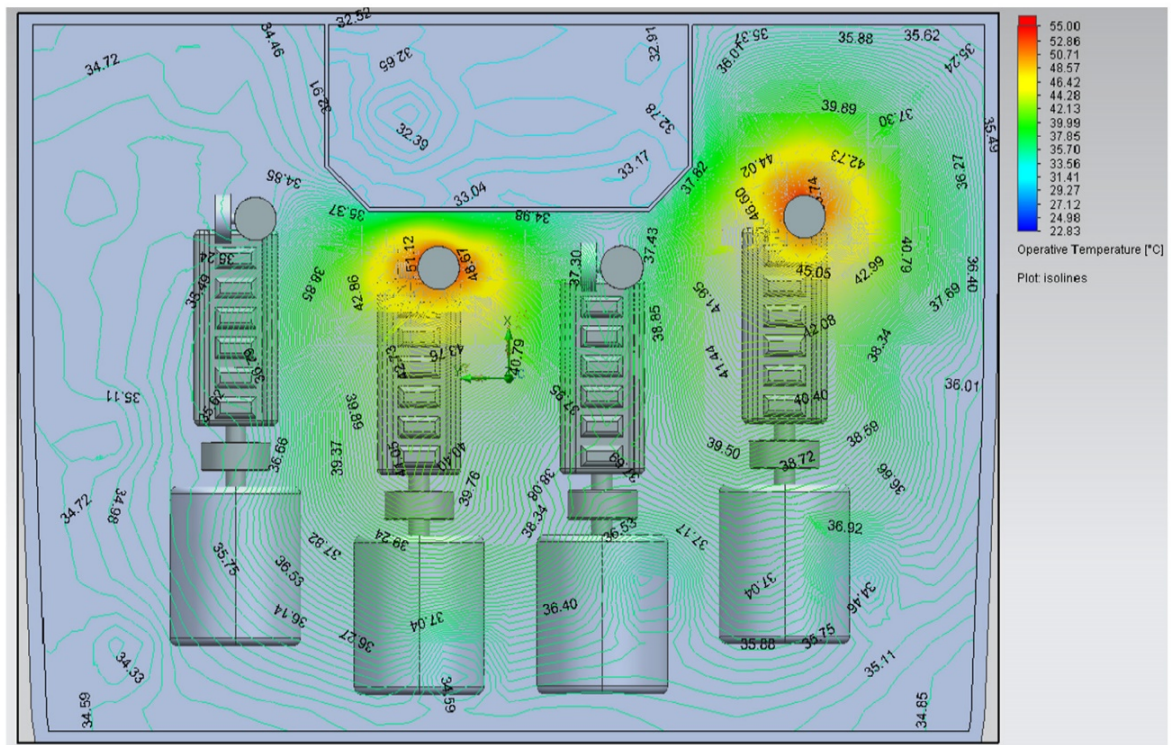


Fig. 6. Indoor air operative temperature in the main engine room.

$$t_r = \frac{3600}{(E_{req} - E_{max})} \quad (2)$$

3. Validation and results

3.1. Computational fluid dynamics validation

To validate the CFD simulations of the indoor air thermodynamic parameters, they were compared with the values sampled during real navigation, being the estimated values of average indoor air temperature, relative humidity and air velocity in complete agreement with the values obtained during real navigation. In this sense, the estimated main engine room average indoor temperature was nearly 31 °C, relative humidity of 77% and pressure about 1 bar.

In a similar way, the main engine and alternator surface temperatures estimated were totally in agreement with the values obtained by the thermographic camera, as shown in Figs. 2 and 3. In particular, main engines and alternators' surface temperature were about 77.5 and 47.8 °C, respectively.

In order to have a complete perspective of working conditions and the level of heat stress in the engine room, once the model is validated, it has been analysed the most relevant thermal parameters in the engine room, which are presented in Figs. 4–7, considering 6 air changes per hour (ACH) and a height of 1.5 m from the platform:

From these figures, it is interesting to note that near the main engine, an average temperature of 35 °C was obtained, increasing in more than three degrees near the turbochargers, while the workshop showed an average temperature of 31 °C.

In a similar way, the air velocity shows very high values close to 0.3 m/s near the main engine, while are reduced to 0.04 m/s in faraway zones of the engine room. In the workshop the air velocity is reduced, with values of about 0.04 m/s.

3.2. Heat stress analysis

As it was noted before, the two most hazardous areas of the engine room were selected in order to define the maximum time that a worker could remain there and carry out his tasks in accordance with actual safety standards, and the minimum time needed to release the accumulated heat in the engine control room.

In this sense, Figs. 8 and 9 present the maximum time that a worker can stay on these places considering the specific characteristics of each task (analysed in Tables 1 and 2), and the real indoor conditions obtained from the CFD simulations:

In a similar way, the minimum time to restore the equilibrium in the engine control room, with a low air velocity of 0.1 m/s and a dry bulb temperature of 19.76 °C, is presented in Fig. 10:

It is interesting to note that in these charts, derived from NTP 18 standard, the time appears as a function of the globe temperature at each point [3]. Even when the globe temperature is not directly calculated by the CFD, in normal conditions, under air velocities below 0.2 m/s, it can be replaced by the operative temperature [25].

Furthermore, in accordance with these research studies, the difference between the operative temperature and globe temperature is less than 0.6 °C under air velocities over 0.2 m/s and the difference between radiant temperature and air temperature is lower than 10 °C [25].

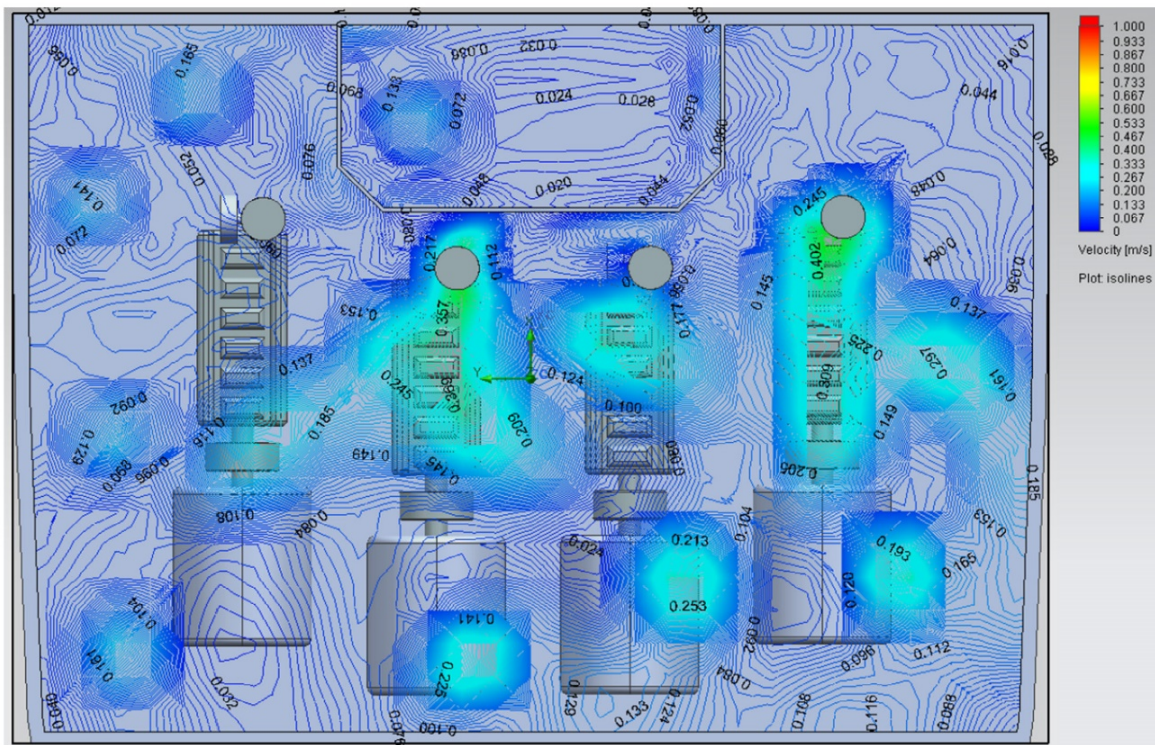


Fig. 7. Indoor air velocity in the main engine room.

Consequently, considering the thermal conditions in the engine room, in this case, the operative temperature obtained from the CFD can be used, instead of the globe temperature, without loss of precision.

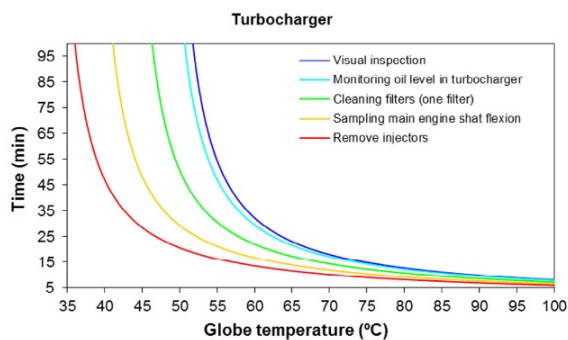


Fig. 8. Maximum time near the turbocharger.

4. Discussion

The present research study analyses the indoor conditions in the engine room of a real merchant ship, using real data to validate CFD simulations and predict the expected conditions.

In particular, two special places were selected: the first one was the area near the main engine turbocharger, being the place where the hottest conditions were expected. The other sampling point was the workshop, because most of the tasks of marine engineers must be done there. The thermal conditions in both points are presented in Table 3.

Table 3 shows the operative temperature to be 51.7 °C in the turbocharger, and if this value is used in Fig. 8 the maximum time allowed for each task can be defined, as shown in Table 4.

In particular it is of special interest to note that the last two tasks shown in Table 4, sampling engine shaft flexion and removing injectors, require more time than that allowed by the work-risk indications, being a clear example of a typical activity that implies a health risk for marine engineers, who are not conscious about this situation.

Consequently, this procedure is very helpful in detecting undesirable conditions, and under an in-depth analysis it allows for

Table 3
Thermodynamic conditions near the main engine and in the workshop.

Place	Air velocity (m/s)	Dry bulb temp. (°C)	Wet bulb temp. (°C)	Operative temp. (°C)	Relative humidity (%)	Maximum time (minutes)	Air changes (1/h)
Turbocharger	0.137	38.1	33.4	51.7	63.7	46.60	6
Workshop	0.133	31.1	27.9	32.1	79.6	1367	6

Table 4

Main tasks to be developed in the engine room.

Task	Minimum time required (min)	Maximum time allowed (min)
Visual inspection (per engine)	6	90
Monitoring oil levels	2	75
Cleaning filters (one filter)	30	40
Sampling main engine shaft flexion	30	25
Remove injectors	30	20

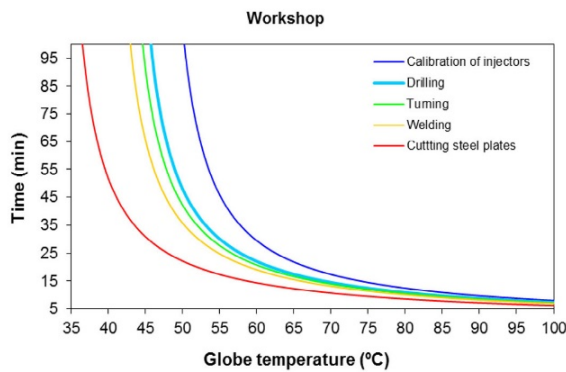


Fig. 9. Maximum time in the workshop.

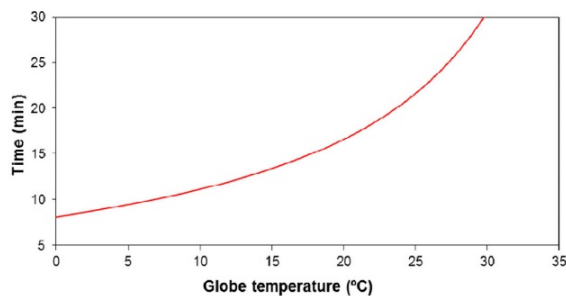


Fig. 10. Minimum time in the engine control room during normal navigation.

proposing very interesting corrections to the normal operative. For example, a simple increment of air changes in the engine room will allow an increment of the maximum time to remain in the engine room doing some tasks, as can be seen in Fig. 11.

Particularly, as shown in Fig. 11, a simple increment to 12 ACH will imply an increment of the maximum acceptable time to do this task over 30 minutes, in clear agreement with the time needed to finish it. It is a clear example of how this procedure can prevent risks at work and improve working conditions.

5. Conclusions

From the present research work, some very interesting conclusions can be obtained:

- A new methodology, based on 3D Computational Fluid Dynamics simulations validated with thermographic camera results, was developed.

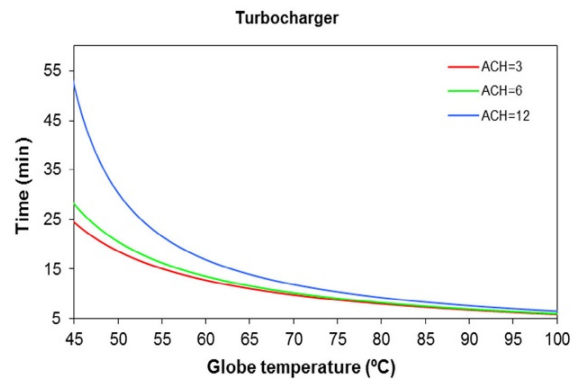


Fig. 11. Effect of air changes to the maximum time allowed near the turbocharger.

- Once the simulations were validated, it was possible to define the zones where heat stress could be a clear risk when developing different maintenance tasks.
- Furthermore, the main tasks developed in the zones were described and considered. In this sense, some tasks that needed more time than that bearable by the human body could be detected.
- New solutions to improve this situation were proposed, for instance, increment of the air changes when some tasks were being developed.

As a final conclusion, the results of the present in-depth study can be an excellent initial guide for future standards to improve and control extreme indoor ambiances in ships not only during design and building, but also during normal operation.

Nomenclature

E_{max}	Maximum heat that can be evacuated by sweating
E_{req}	Heat needed to be evacuated by evaporation
M	Heat generated by the metabolism
C	Heat received or released by convection
R	Heat gained by radiation
t_r	Maximum time

References

- [1] H.L. Hansen, G. Pedersen, Influence of occupational accidents and deaths related to lifestyle on mortality among merchant seafarers, *Int. J. Epidemiol.* 25 (6) (1996) 1237–1243.
- [2] International Maritime Organization, Guidance on fatigue, <<https://www.gov.uk/government/publications/international-maritime-organization-imo-guidance-on-fatigue>>, 2001 (accessed 03.15).
- [3] NTP 18, Heat stress evaluation of severe exposure. <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/001a100/ntp_018.pdf>, (accessed 03.15).
- [4] International Hazard Datasheets on Occupation, Ship-engineer (machinist), <http://www.ilo.org/safework/cis/WCMS_193081/lang-en/index.htm> (accessed 03.15).
- [5] ILO, Accident Prevention on Board a Ship at Sea and in Port, An ILO code on practice (ISBN 92-2-109450-2), ILO, Ginebra, 1996.
- [6] ISO 7547:2002. Ships and Marine Technology. Air-Conditioning and Ventilation of Accommodation Spaces. Design Conditions and Basis of Calculations, 2002.
- [7] ISO 8861:1998. Shipbuilding. Engine-Room Ventilation in Diesel Engine Ships. Design Requirements and Basis of Calculations, 1998.
- [8] K.C. Parsons, International standards for the assessment of the risk of thermal strain on clothed workers in hot environments, *Ann. Occup. Hyg.* 43 (5) (1999) 297–308.
- [9] American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers HVAC Fundamentals, ASHRAE, Atlanta, 1985.

- [10] NTP 350. Heat stress evaluation required sweating index, <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/301a400/ntp_350.pdf> (accessed 03.15).
- [11] ISO 7730:1994, Moderate Thermal Environments. Determination of the PMV and PPD Indexes and Specifications of the Conditions for Thermal Comfort, 1994.
- [12] ISO 7933:2004, Ergonomics of the Thermal Environment. Analytical Determination and Interpretation of Heat Stress Using Calculation of the Predicted Heat Strain, 2004.
- [13] ISO 7243:1989, Hot Environments. Estimation of the Heat Stress on Working Man, Based on WBGT-Index (Wet Bulb Globe Temperature), 1989.
- [14] J. Wang, The current status and future aspects in formal ship safety assessment, *Saf. Sci.* 38 (1) (2001) 19–30.
- [15] J. Wang, Offshore safety approach and formal safety assessment of ships, *J. Safety Res.* 33 (1) (2002) 81–115.
- [16] Z.L. Yang, J. Wang, S. Bonsall, Q.G. Fang, Use of fuzzy evidential reasoning in maritime security assessment, *Risk Anal.* 29 (1) (2009) 95–120.
- [17] P.J. O'Connor, N. O'Connor, Work related maritime fatalities, *Accid. Anal. Prev.* 38 (4) (2006) 737–741.
- [18] S.E. Roberts, P.B. Marlow, Traumatic work-related mortality among seafarers employed in British merchant shipping: 1976–2002, *Occup. Environ. Med.* 62 (3) (2005) 172–180.
- [19] J.A. Orosa, R. Santos, J.A. Pérez, A practical case study of the relationship between work risk prevention and fatigue at work in Spanish merchant ships, *Hum. Fact. Ergonom. Manuf. Serv. Ind.* 21 (5) (2011) 484–492.
- [20] J.A. Orosa, A.C. Oliveira, Assessment of work related risk criteria onboard a ship as an aid to designing its onboard environment, *J. Marit. Sci. Technol.* 15 (1) (2010) 16–22.
- [21] IMO, Energy efficiency measures, <<http://www.imo.org/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Technical-and-Operational-Measures.aspx>> (accessed 03.15).
- [22] J.S. McKarns, R.S. Brief, Nomographs give refined estimate of heat stress index, *Heat. Piping Air Cond.* 38 (1966) 113–116.
- [23] G.F. Belding, T.F. Hatch, Index for evaluating heat stress in terms of resulting physiological strains, *Heat. Piping Air Cond.* 27 (8) (1995) 129–136.
- [24] G.F. Haines, T.F. Hatch, Industrial heat exposures—evaluation and control, *Heat. Vent.* 49 (11) (1952) 93–104.
- [25] M. Kazkaz, M. Pavelek, Operative temperature and globe temperature, *Eng. Mech.* 20 (3/4) (2013) 319–325.

BREVE RESUMEN EN OTROS IDIOMAS

BREVE RESUMEN EN GALEGO

9.1. Obxecto da Tese. Antecedentes

Na contorna socioeconómica actual, altamente competitiva e con custos enerxéticos crecentes, resulta esencial a adopción de novas estratexias de optimización e aforro enerxético orientadas a un uso eficaz dos recursos dispoñibles, sobre todo no caso de equipos e sistemas móbiles, por canto o combustible debe ser transportado polo propio elemento, reducindo tanto o espazo libre dispoñible, como a carga útil transportable.

Este aspecto adquire especial relevancia no caso de buques e artefactos mariños, tendo en conta que non existe unha rede de estacións de servizo suficientemente ampla nas que se poida repostar facilmente e calquera intento de repostaxe en alta mar resulta complexo e altamente custoso, requirindo buques especiais de avituallamento, así como un adecuado estado do mar.

Como consecuencia, na actualidade o transporte marítimo representa un dos obxectivos clave nas políticas de aforro enerxético a nivel mundial, de tal modo que no ano 2009 o Comité de Protección do Medio Mariño (MEPC) da Organización Marítima Internacional (IMO), tomando conciencia do problema, promove o desenvolvemento dunha completa estratexia para a mellora do desempeño enerxético en buques.

En base aos traballos do comité, no 2011, o IMO aprobou o Plan de Eficiencia Enerxética en Buques (SEEMP), marco regulatorio obrigatorio baixo o que se engloba un amplo conxunto de medidas técnicas e operacionais en materia de eficiencia enerxética en buques, que finalmente entrou en vigor en xaneiro do 2013.

Os estudos efectuados no marco SEEMP permiten establecer que entre os principais puntos de consumo de enerxía nun buque convencional, ademais do sistema de propulsión, cabe destacar o sistema de ventilación e renovación de aire da sala de máquinas, o que representa aproximadamente entre o 3,5% e o 5,5% da potencia nominal instalada.

Como resultado, a sala de máquinas constitúe actualmente un dos puntos principais onde sería de gran interese aplicar unha completa estratexia de mellora da eficiencia enerxética nun buque.

Con todo, do mesmo xeito que ocorre en calquera outra instalación complexa, para garantir un correcto desempeño da mesma non basta simplemente con instalar novos sistemas e equipos, cos seus correspondentes algoritmos de control, senón que é necesario realizar un profundo estudo previo das necesidades reais do sistema.

En base a todas estas consideracións, a presente tese doutoral céntrase no estudo da sala de máquinas de buques modernos, un excelente exemplo de ambiente interior extremo, no que frecuentemente as condicións de servizo dos equipos e persoas que traballan na devandita instalación superan amplamente os límites admisibles.

Aínda así, a pesar da súa importancia, ata hoxe en día esta problemática non foi tratada co rigor e profundidade requiridos, nin por parte das normativas e recomendacións oficiais, nin por parte dos propios deseñadores e usuarios, aínda cando os efectos da exposición do corpo humano a altas temperaturas son relativamente coñecidos.

Cabe sinalar neste sentido que aínda existe un elevado descoñecemento das condicións reais de traballo na sala de máquinas e a súa consecuente influencia tanto na eficacia do desempeño das tarefas executadas, como fundamentalmente na seguridade e saúde do persoal que alí traballa.

Como consecuencia, o desenvolvemento dunha nova metodoloxía eficaz para a optimización de ambientes interiores en buques, require unha exhaustiva análise previa das condicións reais de servizo, que permita establecer as condicións óptimas para que o persoal de abordo poida desempeñar as súas tarefas de forma eficaz e segura, minimizando ao mesmo tempo o consumo de enerxía nos equipos e instalacións.

9.2. Principais Aportacións á Discusión

A presente tese doutoral analiza en profundidade todos os aspectos relacionados co funcionamento do sistema de ventilación e o consumo de enerxía en ambientes interiores industriais extremos, tomando como referencia a sala de máquinas dun buque cableiro de última xeración.

Tendo en conta a complexidade do tema, ademais dos aspectos puramente enerxéticos, é necesario ter en conta as disposicións vixentes en materia de seguridade e hixiene no traballo, de tal modo que a presente análise céntrase en tres aspectos fundamentais:

- Análise e caracterización das condicións térmicas da sala de máquinas en base a un modelo CFD tridimensional validado experimentalmente con datos reais de navegación.
- Análise das tarefas a efectuar polo persoal e mellora das súas condicións de traballo.
- Optimización enerxética do sistema.

Entre as principais contribucións orixinais á discusión cabe destacar o establecemento dunha nova metodoloxía para a análise e optimización enerxética de ambientes extremos directamente aplicable a toda clase de instalacións industriais complexas.

A metodoloxía proposta combina eficazmente os criterios de eficiencia enerxética co cumprimento dos requisitos e disposicións vixentes en materia de seguridade e saúde no traballo, sendo facilmente aplicable tanto durante o deseño de novas instalacións, como tamén para a optimización e mellora de instalacións xa en servizo.

Ademais, dun modo complementario, a metodoloxía desenvolvida permite detectar dun modo eficaz disfuncións na organización e planificación de tarefas do persoal da sala de máquinas e adoptar as medidas correctivas oportunas.

9.3. Estrutura da Memoria de Tese Doutoral

O presente documento, seguindo a estrutura clásica dunha memoria de tese doutoral, presenta dun modo rigoroso unha análise exhaustiva sobre o funcionamento do sistema de ventilación da sala de máquinas dun buque cableiro de última xeración, analizando en detalle a problemática asociada e os principais resultados e avances obtidos.

A presente memoria estruturase en cinco partes claramente diferenciadas, das que os principais contidos descríbense brevemente a continuación:

- Na primeira parte, Formulación e Resumo da Tese, composta polos dous primeiros capítulos, realízase unha breve introdución á presente tese doutoral, centrada nas motivacións e antecedentes da mesma, así como nos principais obxectivos e resultados alcanzados.
- A segunda parte, Materiais e Métodos, comprende os capítulos tres e catro e nela analízase o contexto no que se desenvolveu a presente tese doutoral, revisando os equipos e recursos materiais empregados, así como as metodoloxías de traballo e os condicionantes aplicables.
- Na terceira parte, Resultados e Discusión, composta polos capítulos cinco, seis e sete, analízase en detalle a metodoloxía proposta, tanto no que respecta á súa fundamentación teórica e validación experimental, así como ós principais resultados e avances obtidos.

- Na cuarta parte, Conclusións, realízase unha valoración final do traballo efectuado, presentando as principais conclusións alcanzadas e establecendo algunhas propostas interesantes para futuros desenvolvementos en base á experiencia adquirida durante o presente estudo.
- Finalmente, na quinta parte, Referencias, preséntase unha relación non exhaustiva da bibliografía de referencia manexada durante a realización da presente tese doutoral.

Dun modo complementario, inclúese como anexo un artigo derivado directamente da presente tese doutoral, publicado recentemente na revista *Applied Thermal Engineering*, revista de máxima relevancia na materia que de acordo coa última edición do ISI JCR ocupa a 6ª posición a nivel mundial no ámbito da Termodinámica e a Enxeñería Térmica.

SHORT SUMMARY

10.1. Aim of the Thesis. Motivations

In a highly competitive environment, with increasing energy costs, efficiency and energy saving become critical factors, especially for mobile equipment and systems, considering that fuel must be transported by the own element, reducing the free space available and the maximum payload.

Consequently, maritime transport is one of the primary international objectives for energy saving and pollution reduction, in such a way that in 2009, the International Maritime Organization, IMO, presented a complete strategy for the improvement of the energy efficiency in ships, the Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP).

In this sense, it must be highlighted that excluding the propulsion system, among the main energy consumption elements in a conventional vessel, arises the ventilation and air renovation of the engine room, which represent approximately between 3.5% and 5.5% of the overall power installed.

Nevertheless, as frequently happens in complex installations, it is not enough to just install modern equipment and implement new control algorithms, being also necessary a complete study of the real needs of the ventilation system in order to establish the optimum operational conditions.

In a first approach, the engine room is a highly complex environment, with a great number of elements and equipment, which generate a high amount of heat, exposing both the equipment as well as the people who work in the facility to extreme working conditions.

Nevertheless, even when this environment is clearly related with different hazards at work, there is not an optimal standard solution to this problem due to the high number of parameters to be considered

In this regard, it must be noted that although in the last years several standards and datasheets has been developed by international standardization organizations, they do not provide clear information about the suitable ambience conditions in the engine room in accordance with the tasks that must be developed.

Most of the times, standards are simple theoretical approaches that do not converge with the real conditions on board, in such a way that seafarers usually must establish their own work and resting periods, typically prioritizing finish their tasks quickly, over their own safety, underestimating the risk of a prolonged exposure to extreme hazardous conditions.

10.2. Main Contributions to Discussion

The present PhD. Dissertation discusses in depth all aspects related to the operation and energy consumption of the ventilation system in industrial extreme indoor environments, taking as reference a latest generation cable layer engine room.

Considering the complexity of the issue, it is necessary to consider also the current regulations on labour risk prevention, in addition to energy efficiency criteria, in such a way that the present analysis focus on three key aspects:

- Analysis and characterization of the thermal conditions in the engine room, based on a three-dimensional CFD model experimentally validated with real navigation data.
- Analysis of the tasks that must be performed by the personnel and improvement of their working conditions.
- Energetic optimization of the ventilation system.

Among the main original contributions to the discussion, it has been established a new methodology for the analysis and energetic optimization of extreme environments directly applicable to all kind of complex industrial installations.

In addition, in a complementary way, the methodology proposed permitted also the detection of some issues in the daily task schedule followed by the engine room personnel, allowing the pertinent corrective actions to be taken.

As a final conclusion, this work constitutes an excellent practical example about how thermal engineering can help not only to obtain important energy savings, but also contribute to improve the work conditions, and consequently the quality of life of individuals.

10.3. Organization of the Present PhD. Thesis Dissertation

The present document, following a PhD. Dissertation classical structure, presents in a rigorous way a comprehensive analysis of the engine room ventilation system of a last generation cable layer, analysing in detail the main developments and conclusions achieved during the execution of this PhD. Thesis.

This dissertation has been structured into five parts clearly differentiated, which contents are briefly described below:

- The first part, Motivation and Summary, presents a brief introduction to this dissertation, focused on its motivations and background, as well as the objectives and results achieved.
- Second part, Materials and Methods, presents a complete review of this PhD. Thesis context, analysing the equipment and material resources, as well as the procedures and considerations applicable.
- The third part, Results and Discussion, analyses in detail the proposed methodology, considering both its theoretical foundations and experimental validation, as well as the main results.
- In the fourth part, Conclusions, it is presented a final evaluation of the work done, discussing the main goals and the most important conclusions achieved, and establishing some interesting proposals for future developments on the basis of the experience acquired.
- Finally, the fifth part, References, presents a non-exhaustive list of the reference bibliography managed during the realization of this PhD. Thesis.

In a complementary way, it has been included as annex a recent paper directly derived from this PhD. Thesis, published in the Applied Thermal Engineering Journal.

This journal is one of the most relevant publications in the matter, holding the sixth position in the field of Thermodynamics and Thermal Engineering, according to the latest edition of the ISI JCR.

In addition, in order to facilitate its scientific dissemination, it has been included as a reference a brief summary of the PhD. Thesis in other languages, such as English and Galician.